

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil

**Comparação do Desempenho e de Funcionamento de Programas
Comerciais (ANSYS e SAP2000) Focado à Análise Sísmica**

Rodrigo André Esteves Gonçalves Justo

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia

Orientador: Professora Zuzana Dimitrovová

Lisboa

2010

Agradecimentos

A realização e posterior conclusão desta dissertação tornou-se possível graças ao apoio, colaboração e ajuda de diversas pessoas.

Não querendo mencionar nomes queria aqui mostrar o meu profundo agradecimento a todas essas pessoas e dedicar-lhes este trabalho.

Agradeço de uma forma muito especial a toda a minha família, com especial ênfase aos meus pais que tornaram, não só esta dissertação, mas também todo o percurso escolar que aqui levou, possível.

A TODOS O MEU MUITO OBRIGADO!

Resumo

A evolução da engenharia civil foi em grande parte influenciada pelo aumento das exigências quanto à utilização de estruturas, o que tornou as tipologias das soluções construtivas implementadas hoje em dia mais variadas e abrangentes. Essa maior complexidade das estruturas levou a uma necessidade de aperfeiçoamento dos métodos de cálculo, para que desta forma fosse garantida a segurança e se reduzissem os custos de produção.

Foi devido a esta necessidade que vários métodos de análise foram desenvolvidos. Entre eles encontra-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), que pela sua simplicidade e grande aproximação dos resultados à realidade o tornou o método mais utilizado pelos projectistas de todo o mundo.

O desenvolvimento do MEF, aliado ao desenvolvimento dos meios informáticos, tornou possível a criação de programas de cálculo que se transformaram nas maiores ferramentas de auxílio dos projectistas de hoje em dia.

Neste trabalho faz-se uma comparação, na óptica do utilizador comum, entre dois destes programas comerciais de cálculo: ANSYS e SAP2000, focando à “análise modal por espectro de resposta” de acordo com o Regulamento de Segurança e Acções (RSA).

A realização deste trabalho assenta na modelação do mesmo edifício nos dois programas, realização de três tipos de análise em cada modelo, comparação de facilidades de utilização e de variedade de funcionalidades disponíveis e na comparação dos resultados destas análises: análise estática, análise modal e análise espectral. Baseado nestes factos será possível realizar a comparação proposta na presente dissertação.

Palavras-chave: Método dos elementos Finitos, ANSYS, SAP2000, Análise modal, Análise estática, Análise modal por espectros de resposta, modelação.

Abstract

Civil engineering evolution has been mainly influenced by increased demand on structures utilization, hence the construction solution typology implemented nowadays is more variable and complex. This increased structural complexity originated a necessity for improvement in calculation methods to guarantee safety and reduce production cost.

Several calculation methods have been developed due to this demand. Among them one could name the Finite Element Method (FEM), which due to its simplicity and results accuracy became the most utilized method by structural engineers and designers over the world.

The FEM progress, together with evolution of computational technologies, allowed for software development, which became the major auxiliary tool for civil engineers nowadays.

A comparison between two software ANSYS and SAP2000, from the point of view of the common user, is presented in this work. This comparison is focused on response spectrum analysis according to the Portuguese national regulation “Regulamento de Segurança e Acções (RSA)”.

The work presented in this thesis encompasses a finite element model development of the same building structure and execution of three analyses, namely static, modal and response spectrum analyses, in both software. Detailed evaluation involving the usage simplicity, the variety of functionality options and results comparison of these three analyses, is presented. Based on these studies final conclusions are drawn.

Keywords: Finite element method, ANSYS, SAP2000, Modal analysis, Static analysis, Response Spectrum analysis, modelling.

Índice

Agradecimentos	I
Resumo.....	II
Abstract	III
Índice.....	IV
Índice de Figuras	VI
Índice de Tabelas.....	VIII
Introdução.....	1
Capítulo I - Fundamentação Teórica	3
Introdução.....	3
1. História do MEF.....	5
2. Método dos Elementos Finitos	6
3. Malha de Elementos Finitos	10
4. Integração – Pontos de Gauss	13
Capítulo II - Caracterização do Edifício Estudado.....	16
Descrição	17
Simplificações do Modelo	20
Capítulo III - Modelação da Estrutura	22
Introdução.....	22
1. Definição de Materiais	23
2. Elementos Finitos	26

3. Geometria da Estrutura.....	27
4. Apoios e Ligações	32
5. Malha.....	32
6. Carga.....	33
7. Considerações Gerais do Trabalho.....	35
 Capítulo IV - Ensaio e Análises de Resultados	41
Introdução	41
1. Processamento – Introdução	41
2. Análise Estática.....	43
2.1. SAP2000 - Análise Estática	45
2.2. ANSYS - Análise Estática	46
2.3. Análise Estática - Resumo	46
3. Análise Modal.....	50
3.1. Apresentação de Resultados - Análise Modal.....	53
3.2. Análise Modal – Resumo	54
4. Análise Sísmica por Espectros de Resposta.....	56
4.1. SAP2000 - Análise Sísmica por Espectros de Resposta	61
4.2. ANSYS - Análise Sísmica por Espectros de Resposta	64
4.3. Análise Sísmica por Espectros de Resposta - Resumo	67
 Considerações Finais	73
 Bibliografia	75
 ANEXO I	76

Índice de Figuras

FIGURA 1 - DIVISÃO DE ESTRUTURA EM ELEMENTOS FINITOS [AZEVEDO, 2003].....	3
FIGURA 2- RAY CLOUGH	5
FIGURA 3 – ESQUEMA DOS PASSOS A SEGUIR PARA RESOLVER UM PROBLEMA DE ENGENHARIA [CISMASIU, 2007].....	7
FIGURA 4 – ELEMENTO FINITO TRIANGULAR (3 NÓS)	11
FIGURA 5 – ELEMENTOS FINITO QUADRANGULAR (4 NÓS).....	11
FIGURA 6 – ELEMENTOS FINITOS DE BARRA (2 NÓS)	12
FIGURA 7 – RESULTADOS NOS ELEMENTOS FINITOS DA ESTRUTURA	14
FIGURA 8 - RESULTADOS NOS NÓS DA ESTRUTURA	15
FIGURA 9 – OS DOIS BLOCOS DO DEPARTAMENTO DE ENG.ª CIVIL.....	16
FIGURA 10 – ENTRADA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL	16
FIGURA 11 – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL.....	17
FIGURA 12 – MODELO DE UMA LAJE FUNGIFORME.....	18
FIGURA 13 – PLANTA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL.....	18
FIGURA 14 - PLANTA DO PISO 2	21
FIGURA 15 – QUADRO BÁSICA DE DEFINIÇÃO DE MATERIAIS DO SAP2000	24
FIGURA 16 - QUADRO AVANÇADO DE DEFINIÇÃO DE MATERIAIS DO SAP2000	25
FIGURA 17- QUADRO DE DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS (ANSYS).....	25
FIGURA 18 - QUADRO DE DEFINIÇÃO DE SECÇÕES NO ANSYS	27
FIGURA 19 - CONJUNTO DE “GRIDS”	28
FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO DE EIXOS LOCAIS NO SAP2000	29
FIGURA 21- MODELO DO PRIMEIRO PISO EM SAP2000	30
FIGURA 22 - MODELO DO PRIMEIRO PISO EM ANSYS.....	30
FIGURA 23 - MODELO COMPLETO EM ANSYS	31

FIGURA 24 – DUAS VISTAS NO AMBIENTE DE TRABALHO DO SAP2000	32
FIGURA 25 – MODELO JÁ COM MALHA.....	33
FIGURA 26 - MODELO DE MASSAS.....	34
FIGURA 27 – MODELO EM ANSYS COM AS CARGAS DA COBERTURA COLOCADAS	35
FIGURA 28 – AMBIENTE DE TRABALHO DO ANSYS	36
FIGURA 29 - AMBIENTE DE TRABALHO DO SAP2000	37
FIGURA 30 – APRESENTAÇÃO DOS “KEYPOINTS” EM ANSYS	38
FIGURA 31 – MODELO EM SAP2000	39
FIGURA 32 – JANELA DA AJUDA DO ANSY	40
FIGURA 33 – DEFORMADA DA ESTRUTURA CAUSADA PELA COMBINAÇÃO ESTATICA PELO PROGRAMA SAP2000	47
FIGURA 34 - DEFORMADA DA ESTRUTURA CAUSADA PELA COMBINAÇÃO ESTATICA PELO PROGRAMA ANSYS.....	48
FIGURA 35 – GRÁFICO PARA COMPARAÇÃO DE FREQUÊNCIAS.....	54
FIGURA 36 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (CQC)	59
FIGURA 37 – DEFORMADA EM SAP2000 PROVOCADA PELA SIMULAÇÃO DO SISMO TIPO 1 NA DIRECÇÃO X.....	62
FIGURA 38 - DEFORMADA EM SAP2000 PROVOCADA PELA SIMULAÇÃO DO SISMO TIPO 2 NA DIRECÇÃO X	63
FIGURA 39 - DEFORMADA EM ANSYS PROVOCADA PELA SIMULAÇÃO DO SISMO TIPO 1 NA DIRECÇÃO X	65
FIGURA 40 - DEFORMADA EM ANSYS PROVOCADA PELA SIMULAÇÃO DO SISMO TIPO 2 NA DIRECÇÃO X	66
FIGURA 41 - DEFORMADAS DO SISMO 1 – COMPARAÇÃO	68
FIGURA 42 - DEFORMADAS DO SISMO 2 – COMPARAÇÃO	69

Índice de Tabelas

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DO BETÃO C25/30.....	19
TABELA 2 – SECÇÕES DOS ELEMENTOS ESTRUTURAS VERTICAIS	19
TABELA 3 – CARGAS CONSIDERADAS EM PROJECTO	20
TABELA 4 – RESUMO DOS CÁLCULOS DA CARGA PERMANENTE DA ESTRUTURA.....	44
TABELA 5 – CÁLCULO DA ÁREA DE CADA PISO.....	44
TABELA 6 – TOTAL DE CARGA E SOBRECARGA DA ESTRUTURA	45
TABELA 7 - RESULTADOS DO SAP2000	45
TABELA 8 - RESULTADOS DO ANSYS.....	46
TABELA 9 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NA ANÁLISE ESTATICA	49
TABELA 10 - CARGAS PROVOCADAS PELOS ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO	50
TABELA 11 - FREQUÊNCIAS E PERÍODOS PRÓPRIOS	53
TABELA 12 - DEFINIÇÃO DOS SISMOS	60
TABELA 13 - DESLOCAMENTOS MÁXIMOS POR ESPECTROS DE RESPOSTA EM SAP2000 (SISMO 1)	61
TABELA 14 – POSIÇÃO DOS NÓS ONDE SE VERIFICA O DESLOCAMENTO MÁXIMO NO SISMO 1	61
TABELA 15 - APRESENTAÇÃO DOS ESFORÇOS PARA O SISMO TIPO 1 - SAP2000.....	62
TABELA 16 - DESLOCAMENTOS MÁXIMOS POR ESPECTROS DE RESPOSTA EM SAP2000 (SISMO 2)	63
TABELA 17 - POSIÇÃO DOS NÓS ONDE SE VERIFICA O DESLOCAMENTO MÁXIMO NO SISMO 2	63
TABELA 18 - APRESENTAÇÃO DOS ESFORÇOS PARA O SISMO TIPO 2 - SAP2000.....	64
TABELA 19 - DESLOCAMENTOS MÁXIMOS POR ESPECTROS DE RESPOSTA EM ANSYS (SISMO 1).....	64
TABELA 20 – POSIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS MÁXIMOS SISMO 1.....	64
TABELA 21 - APRESENTAÇÃO DOS ESFORÇOS PARA O SISMO TIPO 1 - ANSYS.....	65

TABELA 22 - DESLOCAMENTOS MÁXIMOS POR ESPECTROS DE RESPOSTA EM ANSYS (SISMO 2)	65
TABELA 23 – POSIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS MÁXIMOS SISMO 2.....	66
TABELA 24 - APRESENTAÇÃO DOS ESFORÇOS PARA O SISMO TIPO 2 - ANSYS.....	66
TABELA 25 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS RELATIVOS AO SISMO 1.....	67
TABELA 26 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS RELATIVOS AO SISMO 2.....	67
TABELA 27- DESLOCAMENTOS DO SISMO 1 - COMPARAÇÃO.....	68
TABELA 28 - DESLOCAMENTOS DO SISMO 2 - COMPARAÇÃO	69
TABELA 29 - FACTOR DE PARTICIPAÇÃO	70
TABELA 30 - FACTOR DE PARTICIPAÇÃO SISMO 1	71
TABELA 31 - FACTOR DE PARTICIPAÇÃO SISMO 2	71
TABELA 32 - DESLOCAMENTO MÁXIMO DO MODO COM MAIOR FACTOR DE PARTICIPAÇÃO.....	71
TABELA 33 – DEFORMADA DOS MODOS DE VIBRAÇÃO	85

Introdução

O objectivo deste trabalho é a comparação entre dois programas comerciais de cálculo automático de estruturas, que utilizam como base de funcionamento o Método dos Elementos Finitos (MEF). Todo o trabalho será realizado na óptica do utilizador comum destes programas, fazendo uma análise da utilização e manuseamento de cada programa, bem como uma análise de comparação dos resultados fornecidos por estes quando associados a uma análise estrutural.

Este trabalho foi escolhido pela necessidade do autor de compreender o funcionamento deste tipo de programas de cálculo, uma vez que estas são as ferramentas mais úteis que os projectistas têm ao seu dispor. Com o decorrer deste trabalho, o autor aprofundou o seu conhecimento em várias matérias importantes para o trabalho do engenheiro civil na área das estruturas, nomeadamente a utilização e manuseamento destes programas, a compreensão do Método dos Elementos Finitos bem como o aprofundamento de conhecimento das análises utilizadas para a realização desta dissertação, nomeadamente da análise modal por espectro de resposta de acordo com a regulamentação do RSA, uma vez que este era o regulamento em vigor aquando da realização do projecto original da estrutura em estudo. Este trabalho tornou-se muito importante para o autor, dado que Portugal se encontra na zona de actividade sísmica, e portanto o autor teve um aprofundamento útil quer para avaliação das estruturas existentes, quer para o projecto sismo - resistente das estruturas novas.

No Capítulo I pode encontrar-se uma breve introdução teórica ao método em que assenta o funcionamento destes programas, o MEF. São referidos alguns pontos-chave da história deste método bem como os traços gerais do funcionamento do mesmo.

No Capítulo II fala-se do edifício escolhido para realizar este trabalho, descrevendo a solução construtiva bem como os elementos considerados na fase de projecto e que serão considerados nesta modelação.

No Capítulo III pretendeu-se falar da modelação do edifício bem como as diferenças e dificuldades que o autor sentiu em relação a cada uma das ferramentas.

No Capítulo IV, o autor realizou uma breve fundamentação teórica das análises que iriam ser alvo de estudo. É também neste capítulo que se irão encontrar os resultados e as análises feitas nestes programas.

Nas Considerações Finais do Trabalho apresentam-se os comentários e conclusões gerais desta dissertação.

Capítulo I - Fundamentação Teórica

Introdução

Como se pode constatar na introdução deste trabalho, o objectivo final é a comparação de dois programas comerciais de cálculo de estruturas, o ANSYS (Analysis Systems) [Dimitrovová, 2009] e o SAP2000 (Structural Analysis Program) [CSI, 2009].

Estes dois programas são duas ferramentas de auxílio ao cálculo de estruturas que tornam mais fácil a vida dos projectistas de hoje. Para se poder realizar um bom estudo destes programas é necessário perceber o seu funcionamento e conhecer as bases em que assenta o desenvolvimento dos cálculos feitos pelo computador.

O Método dos Elementos Finitos (MEF), é a base da maioria dos programas de cálculo de estruturas utilizados hoje em dia e, neste ponto, nem o ANSYS nem o SAP2000 são excepção. Por este motivo, neste capítulo vão abordar-se as bases deste método para se poder compreender o que está por trás dos programas em análise.

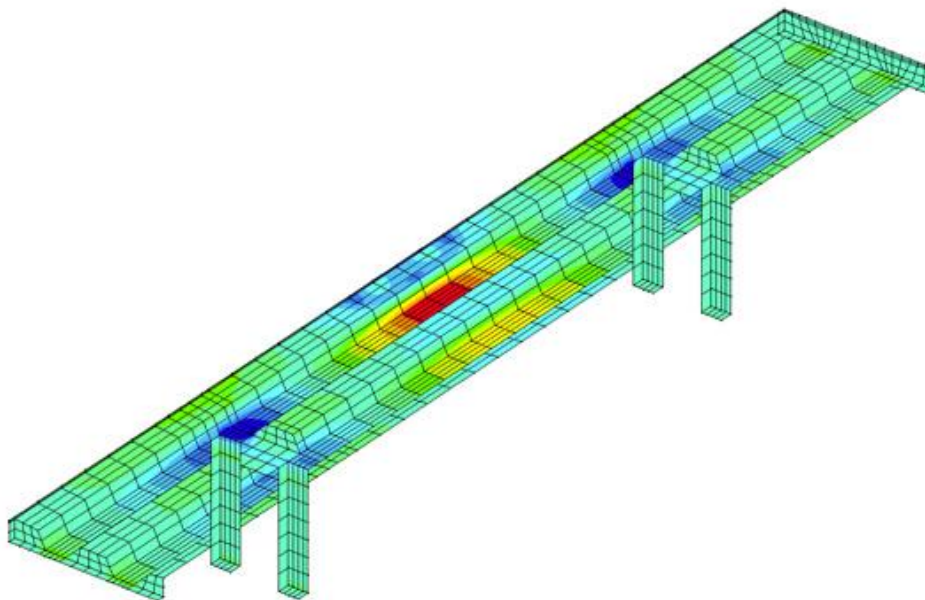


Figura 1 - Divisão de Estrutura em elementos Finitos [Azevedo, 2003]

Antes de mais é necessário compreender o porquê de o MEF ser um método tão atractivo e tão utilizado em detrimento de todos os outros métodos possíveis para o cálculo de problemas de Engenharia: isto acontece uma vez que o MEF consegue obter soluções muito aproximadas para os problemas, dividindo a estrutura complexa em várias subestruturas simples com comportamento conhecido. A cada subestrutura dá-se o nome de "Elemento Finito". Assim fica-se com várias estruturas mais simples que a original, que garantem a continuidade entre cada uma dessas estruturas e as condições de fronteira. Na Figura 1 mostra-se a divisão de uma estrutura em elementos finitos, ou seja a malha dos elementos finitos.

É preciso notar que em estruturas muito complicadas o número de equações diferenciais resultantes deste método é tão elevado que só se torna possível chegar a um bom resultado através do auxílio de computadores.

A análise pelo Método dos Elementos Finitos não produz uma fórmula ou uma solução exacta dos problemas, mas sim uma aproximação dessa solução. Por este motivo, o utilizador destas ferramentas deve ter vários aspectos em consideração:

- Como se trata apenas de uma ferramenta, que apesar de muito poderosa pode apresentar erros, o utilizador deve sempre ter um olhar crítico para todos os resultados, quer-se com isto dizer que o projectista não deve aceitar os resultados sem se certificar que estes são aceitáveis para cada situação, podendo mesmo realizar alguns cálculos simples para poder despistar algum erro mais grosseiro.
- O utilizador deve conhecer as bases do Método dos Elementos Finitos para que desta forma possa formular o problema correctamente e assim minimizar a possibilidade de erros que mais tarde poderão levar a acidentes graves.
- O modelo matemático escolhido deve estar de acordo com a solução prevista e deve fornecer resultados confiáveis com mínimo esforço, tornando-se assim mais eficiente.
- O projectista deve ter em atenção que o MEF resolve apenas o modelo de cálculo escolhido, não extrapolando fenómenos que não estão contidos nesse modelo.

A devida atenção nos aspectos referidos, pode evitar acidentes graves, salvando vidas humanas e evitando perdas materiais elevadas.

1. História do MEF

Apelidado pela primeira vez como “Elementos Finitos” em 1960 [Reddy, 1993] na publicação de Ray Clough (Figura 2), este método deu os seus primeiros passos em 1941 pelas mãos de Hrenikoff, que então intitulou o seu trabalho de “Método das Estruturas” [Reddy, 1993]. Ao longo dos tempos vários estudiosos foram evoluindo estes trabalhos até aos dias de hoje.

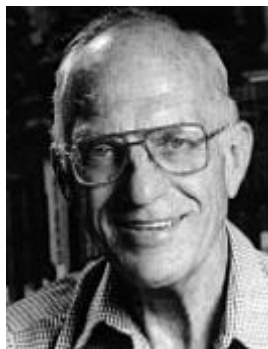


Figura 2- Ray Clough

Nos anos 60 e início de 70, foram feitas as maiores evoluções para se chegar ao que hoje se conhece pelo Método dos Elementos Finitos. Começando apenas por elementos finitos mais comuns como os triangulares e tetraédricos, havendo depois uma evolução para chegar aos quadrangulares e mais tarde aos hexaedros.

Foi com o desenvolvimento dos meios informáticos que este método passou a ser uma realidade para os projectistas em geral e uma ferramenta de grande utilidade para o seu trabalho.

Porém, os programas que utilizam este método nem sempre foram tão fáceis de utilizar como o são nos dias de hoje. Nos primórdios, o projectista que trabalhava nestes programas tinha também de ser programador para conseguir produzir o modelo matemático nos programas. Isto acontecia porque o interface com o utilizador não era de uso facilitado. Com o desenvolvimento das técnicas informáticas estes programas foram também melhoradas e hoje em dia qualquer projectista pode utilizar estas ferramentas, facilitando assim o seu trabalho.

2. Método dos Elementos Finitos

Para analisar um problema de Engenharia é necessário seguir alguns passos fundamentais:

- Formulação do problema físico;
- Simplificações e formulação do modelo matemático;
- Resolução dos modelos matemáticos;
- Interpelação dos Resultados.

Para a resolução de um problema em engenharia existem três maneiras possíveis de o fazer:

- Método Analítico – Resolução do problema por meio de desenvolvimento de equações teóricas, tem como vantagem a exactidão das soluções porém só está disponível para problemas simples;
- Método Experimental – este método apresenta uma grande confiança nos resultados, porém é um método que se torna muito dispendioso;
- Método Numérico – este é um método que apresenta um conjunto de cálculos simples e repetitivos. Este método simula a realidade e apresenta vantagens como a possibilidade de criar várias versões de possíveis soluções para se chegar a um resultado mais fiável.

Os métodos numéricos são assim os mais vantajosos nos dias de hoje pela sua aproximação da realidade juntando a rapidez do processo, agora facilitado pelos computadores. O MEF é actualmente o método numérico mais utilizado para as soluções aproximadas dos problemas de Engenharia, como o dimensionamento de grandes estruturas, bem como simulação de comportamento da estrutura quando solicitada, por exemplo, por um sismo.

O MEF tornou-se um método tão utilizado devido à sua simplificação, pegando num domínio complexo e dividindo-o em vários subdomínios com formas e comportamentos conhecidos, garantindo sempre a continuidade do campo de deslocamento ou do campo de tensão (de acordo com a formulação escolhida) e respeitando as condições de fronteira.

Os elementos finitos são as subestruturas resultantes da divisão da estrutura principal, como já foi referido, o comportamento de cada elemento finito é desde logo conhecido, e a soma dos comportamentos resulta no comportamento da estrutura alvo de estudo.

Apesar do desenvolvimento recente dos métodos sem malha, tradicionalmente (nos métodos com malha) a cada elemento finito correspondem n nós que são o elo de ligação entre os vários elementos finitos e é onde é explicitamente conhecido o resultado das análises. Nos restantes pontos dos elementos é preciso fazer interpolações para se conhecer o resultado aproximado da análise nesse ponto.

Através da Figura 3 pode observar-se um esquema simplificado dos passos a seguir, quando se pretende resolver um problema de engenharia através do MEF.

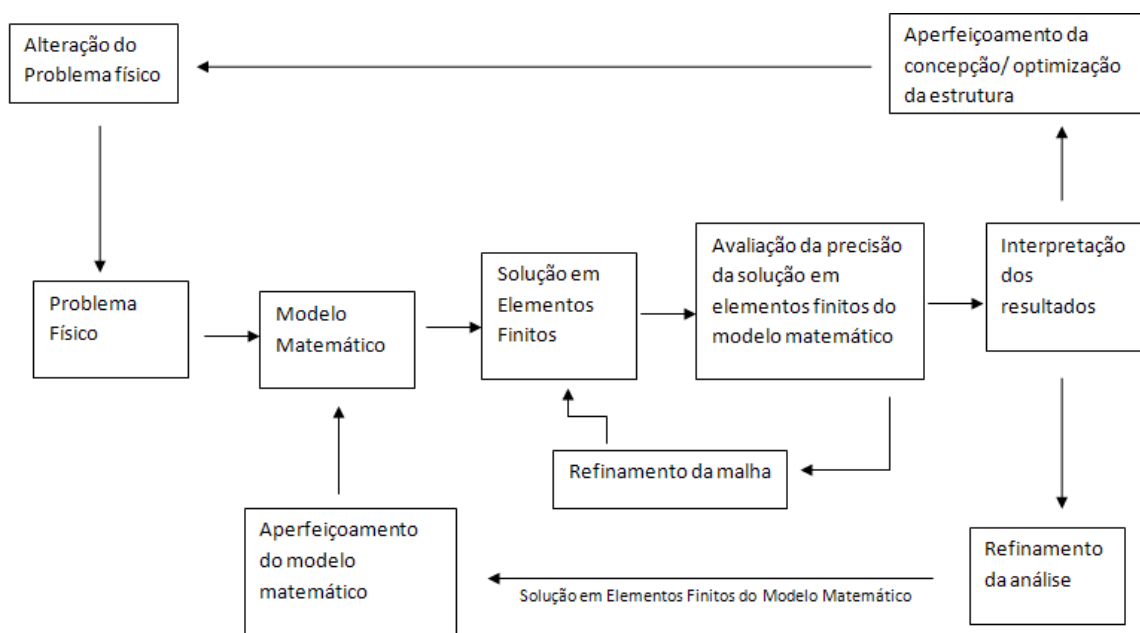


Figura 3 – Esquema dos passos a seguir para resolver um problema de Engenharia [Cismasiu, 2007]

Para a formulação dos deslocamentos, as equações fundamentais do MEF podem ser deduzidas utilizando o princípio variacional de Lagrange, que estabelece que de todos os campos de deslocamento admissíveis, a solução do problema corresponde àquele que dá mínimo ao funcional da energia potencial total do sistema, onde:

$$\Pi = \int_V W(\epsilon) dV - \int_V u^T f dV - \int_{S_p} u^T p_0 dS \quad (1)$$

Onde:

W – densidade de energia de deformação interna

ϵ - campo tensorial de deformação admissível

u – campo vectorial de deslocamento admissível

p_0 – vector de forças de superfície aplicadas na parte de fronteira do domínio examinado S_p

f – vector de forças de volume

V – volume do domínio examinado

Os deslocamentos admissíveis são funções contínuas e satisfazem as condições de fronteira cinemáticas. As deformações admissíveis são obtidas dos deslocamentos admissíveis usando as equações deformações-deslocamento. Assumindo comportamento do material linear elástico, a densidade de energia de deformação escreve-se:

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon^T \cdot k \cdot \varepsilon \quad (2)$$

em que k representa a matriz de rigidez.

Para resolver o problema de minimização do funcional Π , as funções de deslocamento aproximam-se usando as funções de base, que são as funções de interpolação das componentes do deslocamento sobre cada elemento finito. Os deslocamentos desconhecidos exprimem-se como soma das funções de interpolação multiplicadas pelos deslocamentos nodais, que formam o vector de parâmetros desconhecidos do problema U . Os deslocamentos nodais designam os valores dos deslocamentos nos nós/vértices dos elementos finitos. Assim chega-se a expressão [Cismasiu, 2007]:

$$u = H \cdot U \quad (3)$$

válida em cada elemento finito m , sendo H a matriz de interpolação dos deslocamentos e U vector dos deslocamento nodais do elemento m , ou seja:

$$(4)$$

Quanto às deformações, para cada elemento m , são obtidas pela equação 5:

$$(5)$$

sendo E a matriz de ligação entre os deslocamentos e as deformações, que é obtida pela derivação da matriz interpolação dos deslocamentos em relação aos eixos coordenados:

$$E = \frac{\partial H}{\partial x} \quad (6)$$

Onde para coordenadas cartesianas 3D tem-se,

Substituindo as equações (1), (2) e (3) no funcional de Lagrange, pode-se fazer variação segundo o vector dos deslocamentos nodais U completo, que contém os contribuições de todos os elementos finitos.

Chega-se assim à equação de equilíbrio:

$$K \cdot U = P, \quad (7)$$

onde

$$(8)$$

Se designa por matriz de rigidez global, que é dada pelo somatório das matrizes de rigidez de cada elemento finito m :

$$(9)$$

O vector das cargas aplicadas P , é dado pelo somatório do vector das forças de volume e do vector das forças distribuídas na fronteira S_p .

$$(10)$$

- Vector das forças de massa;
- Vector das forças distribuídas;
- Vector das forças aplicadas nos nós.

Assim, o sistema governativo obtém-se juntando-se à equação de equilíbrio (equação 7) as condições de fronteira:

Onde $\{U\}$ são as condições de fronteira sendo estas impostas pela matriz $[K]$ e $\{R\}$ as reacções nos apoios.

Resolvendo o vector de deslocamentos $\{U\}$ do sistema em cima, onde $\{P\}$ é o vector das cargas aplicadas, é possível calcular as deformações, usando a Equação (5), e as tensões em cada elemento finito a partir da equação seguinte:

(11)

3. Malha de Elementos Finitos

Como foi dito anteriormente neste capítulo, o MEF tem como principal característica a divisão da estrutura em várias subestruturas (elementos finitos) cada uma delas com um comportamento conhecido.

Depois de se ter o modelo geométrico completo, proceder-se-á à discretização da estrutura, o que significa definir os elementos finitos e dividir a geometria completa neles. Esta rede criada sobre a geometria completa chama-se malha de elementos finitos.

A escolha da malha a utilizar é de extrema importância uma vez que é esta malha que vai corresponder com a discretização e por isso vai definir os diversos elementos finitos, ou seja, esta malha vai dividir a estrutura nos diversos subdomínios.

Nos programas de cálculo automático esta tarefa já é facilitada e quando se dá ordem ao programa para gerar a malha a utilizar, está-se normalmente a definir a máxima dimensão do elemento finito, isto depois de se escolher qual o tipo de elemento finito a utilizar.

Existem vários tipos de malha que podem ser escolhidos, dependendo o número de nós que se pretende que cada elemento tenha.

Existem vários formatos para os elementos. Nas análises estruturais, onde existe redução dimensional, as malhas geram-se sobre as superfícies ou sobre as linhas. Nas superfícies poderão ser utilizados elementos que para as funções de forma lineares têm cada um deles respectivamente 3 e 4 nós. Por razões de simplificação, nas figuras seguintes mostram-se apenas os elementos para

análises bidimensionais, ou seja, sem graus de liberdade fora do plano do elemento e sem os de rotações. Os elementos são triangulares (Figura 4) ou quadrangulares (Figura 5).

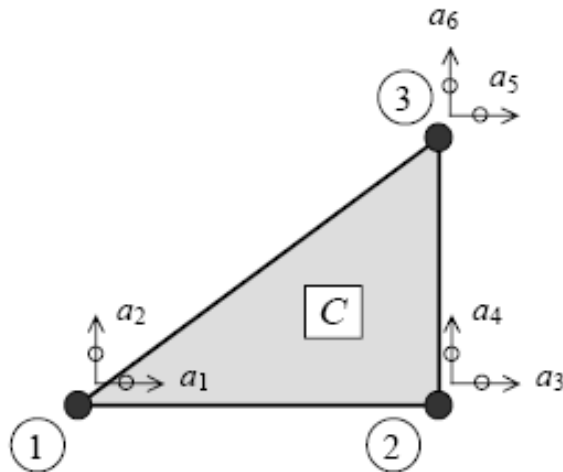


Figura 4 – Elemento Finito Triangular (3 nós)

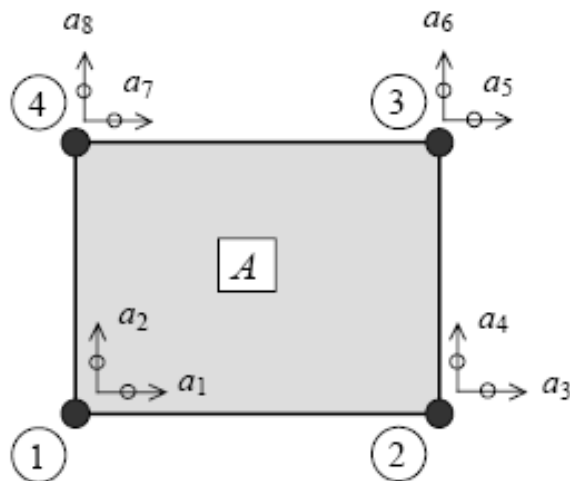


Figura 5 – Elementos Finito Quadrangular (4 Nós)

Para análises em três dimensões tem que ser considerados outros graus de liberdade mencionados em cima. Depois para a escolha de um destes tipos de elementos finitos, deve-se ter em atenção as diferenças existentes entre eles: Os elementos triangulares têm um comportamento mais rígido nas

lajes, porém os elementos de quatro nós podem induzir a erros numéricos, quando algum dos ângulos entre os seus lados é muito agudo.

É de salientar que nas lajes, que são essencialmente sujeitas às cargas transversais, os graus de liberdade de rotação são muito importantes; no entanto em paredes resistentes, sujeitas aos carregamentos no seu plano, estes graus poderão ser desprezados.

Sobre as linhas gerem-se os elementos de barra que para as funções de forma lineares têm apenas dois nós (Figura 6).

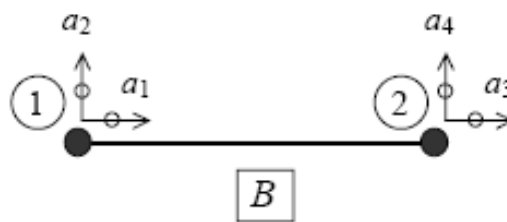


Figura 6 – Elementos Finitos de Barra (2 nós)

No caso em que existem cargas transversais, é preciso utilizar os elementos de viga, que além dos graus de liberdade de translação contêm as rotações.

Para as funções de base de ordem maior, os elementos tem que ter também nós intermédios. Uma vez que os deslocamentos reais calculados serão os que se encontram nos nós, sendo os restantes deslocamentos calculados a partir de interpolações, quantos mais nós existirem, mais o resultado das diversas análises se aproxima da realidade. O procedimento que aproxima os resultados mais à realidade por diminuir o tamanho do elemento (ou seja aumentar o número dos elementos) chama-se refinamento *h*. O método alternativo que também serve para melhorar a precisão de cálculo, aumenta o grau do polinómio das funções base. Este chama-se refinamento *p* e deste modo aumenta-se o número dos nós intermédios, enquanto o tamanho dos elementos mantém-se inalterado.

Porém, a malha mais eficiente nem sempre é a que tem mais nós. A malha mais eficiente é aquela que consegue obter um bom resultado sem que para isso sejam gastos recursos desnecessários no cálculo de cada análise.

Dado a continuidade dos deslocamentos, para a escolha da malha deve fazer-se um pequeno estudo dos resultados baseado em tensões, que para a formulação dos deslocamentos, não preservam à

priori a continuidade nos nós. Nas análises estruturais usam-se para este efeito os esforços internos. Por exemplo uma medida que poderá ser utilizada nas lajes, ou seja partes planas com carga transversal que está sujeita principalmente à flexão, pode corresponder ao segundo invariante do tensor dos momentos, porque num dado ponto da laje o valor não depende do referencial Oxy e assim não é preciso analisar o momento flector em cada direcção (Equação 12):

(12)

A malha a escolher será aquela, que no próximo refinamento não traz uma melhoria dos resultados significativa.

Depois de se definir o tipo de elementos e a sua dimensão está-se em condições para realizar a análise.

Ao longo da estrutura, os elementos não precisam de ser todos do mesmo tamanho. Uma vez que o número de nós influencia a aproximação do resultado real, deve refinar-se a malha nos locais onde se espere um comportamento mais crítico, como por exemplo picos de tensões ou locais onde se espere maior deformação da estrutura. Assim, com uma malha mais pequena e um maior número de elementos finitos nestas zonas vão obter-se resultados mais aproximados dos da realidade e torna-se mais fácil projectar correctamente os locais mais críticos.

4. Integração – Pontos de Gauss

No método dos elementos finitos na formulação em deslocamentos é nos nós que se obtêm os valores dos deslocamentos. No entanto durante a resolução (Equação 8) é preciso efectuar integração sobre a área (volume) dos elementos.

Para a resolução destes integrais são usados métodos de integração numérica, o mais utilizado para este é a “quadratura de Gauss”.

Este método de integração vai relacionar os pontos da amostragem com o peso nesses mesmos pontos. Os pontos de amostragem chamam-se pontos de Gauss.

Para um integral de um polinómio de grau $p=2n-1$ [Azevedo, 2003], chega-se ao valor correcto com n pontos de Gauss.

A expressão genérica da quadratura de Gauss no intervalo $(-1,1)$ é:

(13)

Onde P é o ponto de Gauss e o W é o seu respectivo peso. Para um elemento de linha genérico é preciso utilizar uma transformação, que o permite transformar para domínio $(-1,1)$. Relação semelhante existe em duas e três dimensões.

Deste modo os valores de tensões com a melhor aproximação encontram-se nos pontos de Gauss. Para a visualização é preciso extrapolar estes valores para os nós da estrutura. Para não apresentar valores descontínuos, os programas automaticamente farão uma média dos valores recebidos no mesmo nó dos vários elementos que o contém. Esta visualização de tensões é de facto um pouco “perigosa” para o utilizador, dado que não mostra as descontinuidades que são um dos indicadores mais adequado para o refinamento da malha. Caso o programa de MEF o permita, deveria ser sempre solicitada a visualização dos resultados extrapolados sem esta média implementada, para se poder melhor avaliar a adequação da malha.

O ANSYS permite ver estas extrapolações, consoante se pedem os resultados dos elementos onde existe uma representação descontínua, pode observar-se na Figura 7, ou por sua vez através dos nós onde se observa os resultados de uma forma contínua (Figura 8).

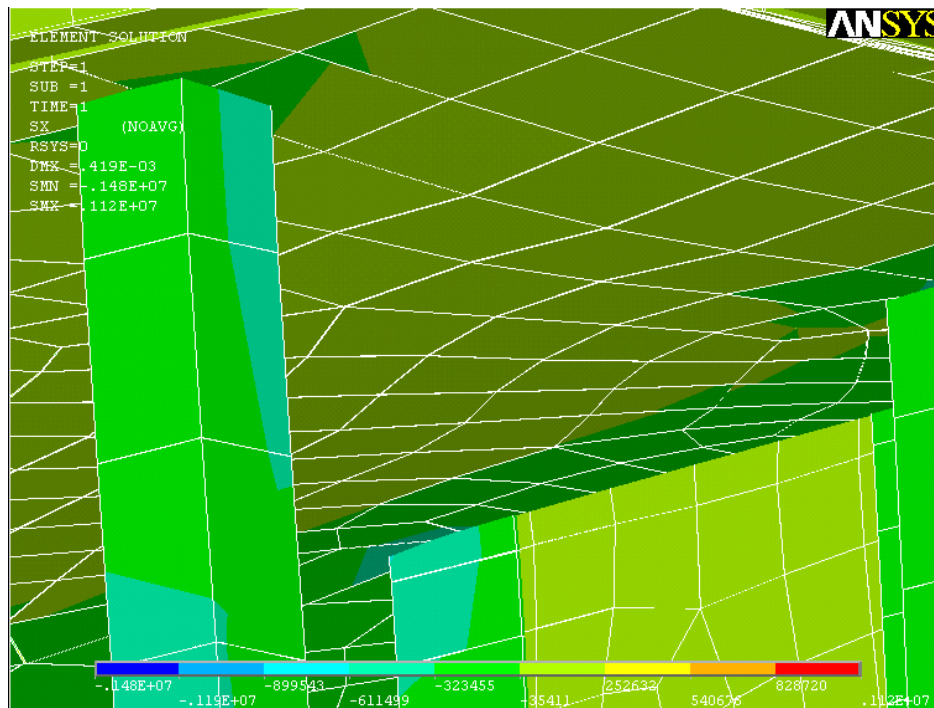


Figura 7 – Resultados nos elementos finitos da estrutura

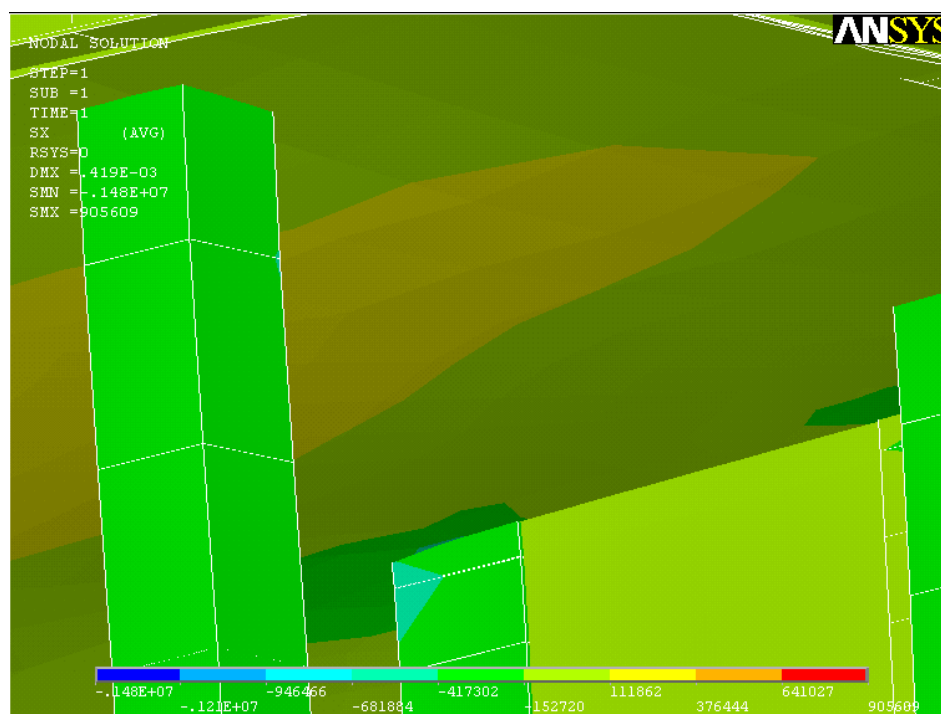


Figura 8 - Resultados nos nós da estrutura

Capítulo II - Caracterização do Edifício Estudado

Uma vez que este trabalho trata da comparação entre dois programas de análise de estruturas, foi necessário encontrar uma estrutura que funcionasse como modelo e base de todo o desenvolvimento e estudo aqui presentes.

O edifício escolhido como ponto de partida para este trabalho foi o Bloco A do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (Figura 9, Figura 10 e Figura 11), uma vez que se trata de um edifício bastante conhecido pelos intervenientes deste trabalho e por existir fácil acesso aos elementos do projecto.



Figura 9 – Os dois Blocos do Departamento de Eng.ª Civil



Figura 10 – Entrada do Departamento de Engenharia Civil



Figura 11 – Departamento de Engenharia Civil

Descrição

O edifício em estudo é constituído por dois blocos ligados por uma ponte metálica e tem um total de 4 pisos. O primeiro desses pisos é enterrado, pelo que são necessários muros de suporte para resistirem às cargas horizontais originadas pela terra, que por sua vez auxiliam a absorção das acções sísmicas. Este edifício conta com um núcleo onde se situam o elevador e uma zona de escadas, o que ajuda também na absorção das cargas sísmicas garantindo um comportamento aceitável dos pilares. A existência deste núcleo vai fazer com que as acções que irão solicitar os pilares sejam menos intensas, devido ao aumento da rigidez global do edifício causado pela inclusão deste elemento.

Este edifício de betão armado é constituído por pilares, na sua maioria de secção rectangular, que têm uma ligação monolítica com as lajes, uma vez que esta estrutura é constituída por um sistema de lajes fungiformes nervuradas (Figura 12) executadas com moldes de polipropileno recuperável e espessura constante de 0,375m. Estas lajes são armadas nas duas direcções e contêm bandas maciças entre os pilares.

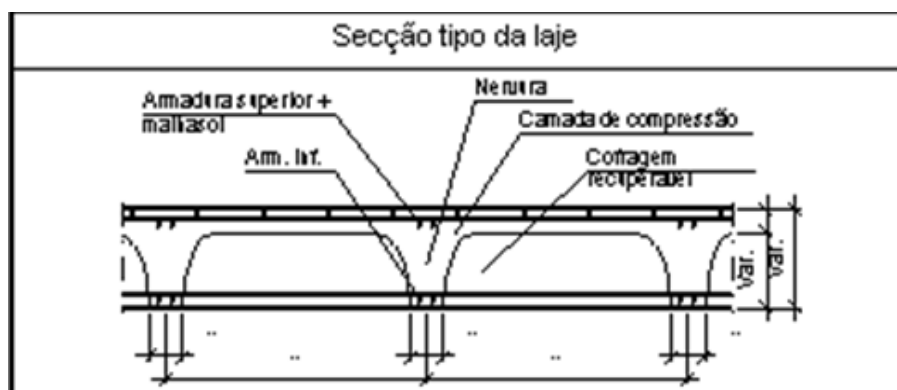


Figura 12 – Modelo de uma Laje Fungiforme

A cobertura dos dois blocos é considerada não acessível e as fundações foram realizadas de forma directa por meio de sapatas rígidas.

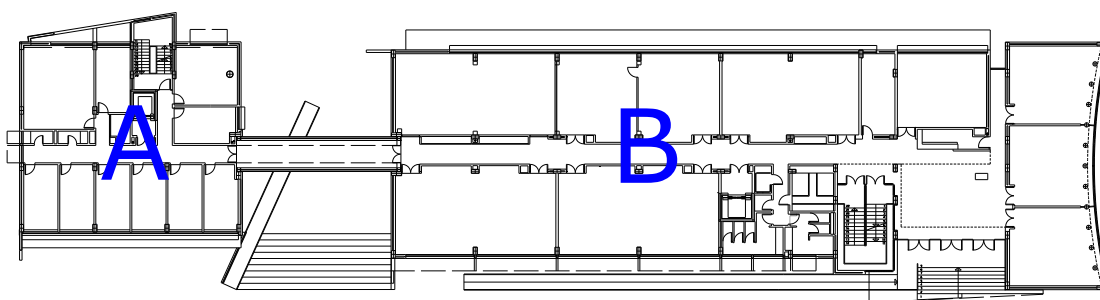


Figura 13 – Planta do departamento de Engenharia Civil

O Bloco A possui em planta (Figura 13) as dimensões 17,89 x 16,60 m, e o B, tem as medidas 57,98 x 19,94 metros.

Segundo o caderno de encargos [Caderno de encargos,1996], o betão considerado em fase de projecto foi de Classe B30.1 agora correspondente à classe C25/30. As características dos betões desta classe e portanto as consideradas neste trabalho são as referidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do Betão C25/30

B30.1 correspondente de C25/30	
Peso Volúmico [kN/m ³]	25
Módulo de Elasticidade [GPa]	31
Coeficiente de Poisson	0,2

Como foi referido anteriormente, este edifício é constituído por elementos verticais na sua maioria de secção rectangular com as seguintes dimensões (Tabela 2), este edifício é também constituído por elementos horizontais que neste caso são as lajes.

Tabela 2 – Secções dos Elementos Estruturas verticais

Nome	X[m]	Y [m]
MS1	0,30	14,87
MS2	17,55	0,30
MS3	0,30	7,54
PA1	0,30	0,60
PA2	0,30	0,60
PA3	0,90	0,30
PA4	0,26	0,60
PA5	0,50	0,50
PA61	0,30	0,60
PA62	0,90	0,26
PA9	0,30	0,60

MS – Muros de Suporte; PA – Pilares do Bloco A.

Para a realização dos ensaios que constituem os objectivos deste trabalho, foi necessário retirar também do caderno de encargos as cargas consideradas em projecto para a realização dos cálculos da estrutura. Uma vez que na altura a legislação em vigor se baseava no RSAEEP (Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes) [caderno de encargos], as consideradas estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Cargas consideradas em projecto

G laje [kN/m^2]	5,20
G paredes Interiores [kN/m^2]	2,50
G paredes Exteriores [kN/m]	12,5
G revestimentos [kN/m^2]	1,20
G elementos Verticais [kN/m^3]	25
Q escritórios [kN/m^2]	3,00
Q cobertura [kN/m^2]	2,00
Impulso de terras [kN/m^2]	9 x H

Em que G representa as cargas permanentes, Q as cargas variáveis e H a altura da parede resistente onde se pretende calcular o Impulso.

Para concluir a descrição do Departamento de Engenharia Civil falta falar da altura entre pisos, considerada em projecto, que é de 3,90m.

Simplificações do Modelo

Para a realização deste modelo foram realizadas diversas simplificações relativamente ao edifício original e uma vez que o objectivo final será a comparação dos programas de cálculo é necessário ter em atenção que estas simplificações têm de ser idênticas para os dois modelos.

Foram modelados os pisos 1, 2, 3 e 4 do edifício original sendo que duas das fachadas do piso 1 são paredes resistentes para suportar as cargas horizontais das terras.

Não foram considerados alguns elementos, tais como a rampa existente no piso térreo bem como o passadiço que liga os dois blocos do departamento de engenharia civil. As escadas do bloco também não foram modeladas.

Outra simplificação passou pela transformação do pilar PA6 em dois pilares de secção rectangular que juntos perfazem as dimensões da secção do pilar original. Também no pilar PA5 foi considerada uma secção quadrada ao longo de todo o edifício em vez da secção circular que se verifica a partir do piso 2.

Por fim não foi considerada a pala existente ao nível dos pisos.

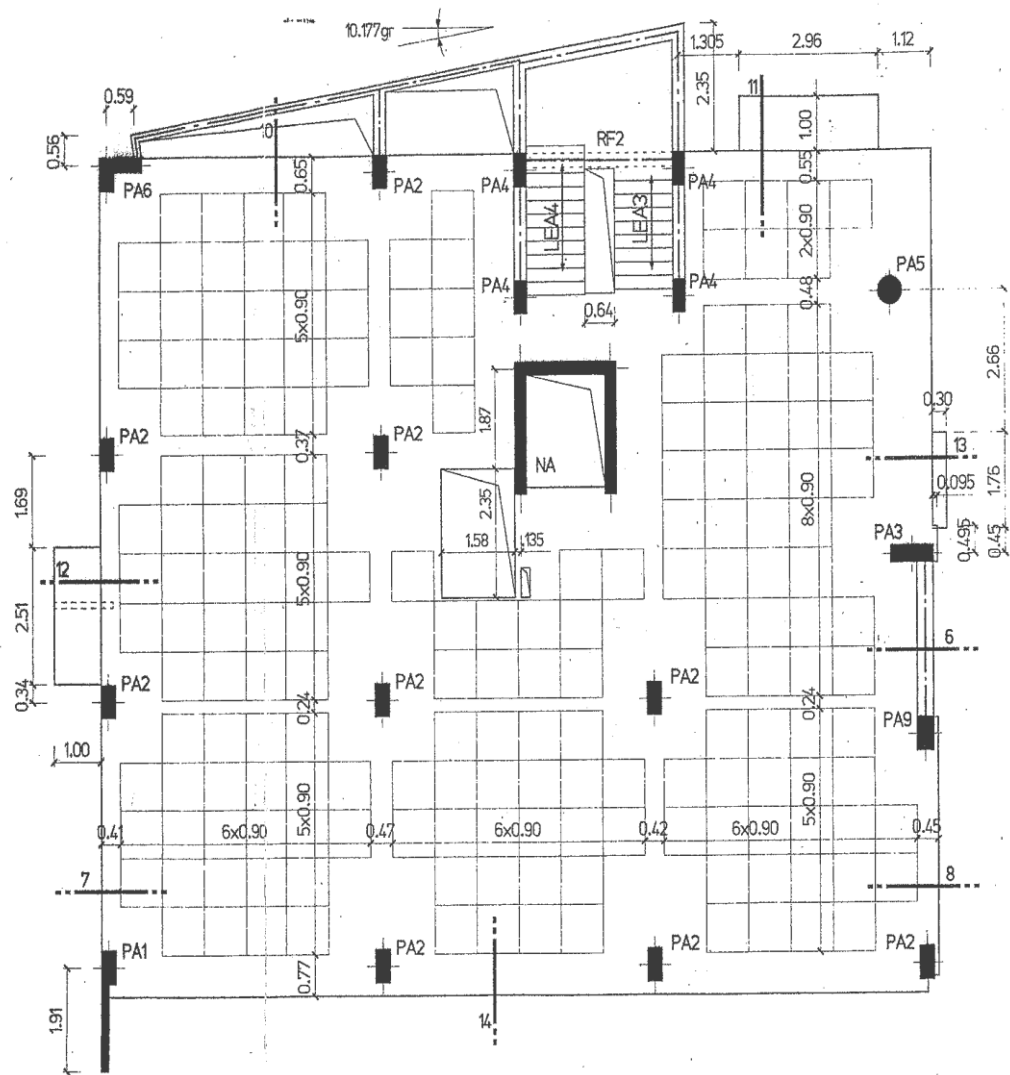


Figura 14 - Planta do piso 2

A Figura 14 corresponde à planta do piso 2 do edifício.

Capítulo III - Modelação da Estrutura

Introdução

No Capítulo 1 resumiu-se o método numérico, mais precisamente o Método dos Elementos Finitos (MEF), que hoje em dia é o mais utilizado para o cálculo automático das estruturas. Este é idêntico para os dois programas analisados: o SAP2000 e ANSYS. No entanto, apesar de a base ser equivalente, as diferenças de utilização e de funcionalidades são grandes e, por essa razão, neste capítulo será feita a caracterização funcional e comparação de cada uma destas ferramentas de trabalho.

Com a utilização destas ferramentas de análise, pode observar-se que as diferenças entre os programas são bem visíveis desde que se inicia cada um deles. Assim que se abre, observa-se uma grande diferença nos dois ambientes de trabalho: enquanto o SAP2000 funciona por meio de botões dispostos ao longo dos bordos do ecrã e menu na parte superior da página, o ANSYS, por seu lado, concentra quase todas as suas funcionalidades numa lista de menus, que se divide em submenus, encontrando-se tudo no lado esquerdo do ecrã, o que torna a mobilidade mais confusa dado que obriga o utilizador a conhecer a fundo o modo de funcionamento e organização deste programa.

Sabe-se à partida que ao longo dos tempos os programas se vão adaptando aos seus maiores utilizadores, querendo com isto dizer que as empresas responsáveis pelo desenvolvimento deste programa vão respondendo às necessidades do grupo mais expressivo dos seus clientes. Por este motivo, o SAP2000 foi-se adaptando mais às necessidades da Engenharia Civil, criando uma série de facilidades para esta classe e tornando assim os seus menus e características mais intuitivas para quem usa o programa para este fim. No que diz respeito ao ANSYS, este não se focou tanto numa área de estudo o que levou a que a sua generalidade de assuntos provocasse uma terminologia mais abrangente e menos direccionada, o que criou a necessidade de introduzir mais informação que não vem a partida pré-definida.

Como em qualquer programa de auxílio ao trabalho de cálculo, estes dois programas são apenas uma ferramenta que facilita a realização da análise das estruturas. Por este motivo, é necessário ter um bom conhecimento teórico e numérico e uma grande capacidade crítica para poder avaliar a viabilidade dos resultados apresentados pelo programa. Para complementar o estudo realizado nestes programas de cálculo deve realizar-se uma verificação simples de um resultado fundamental.

Pode dividir-se a utilização completa destes programas em três grandes grupos:

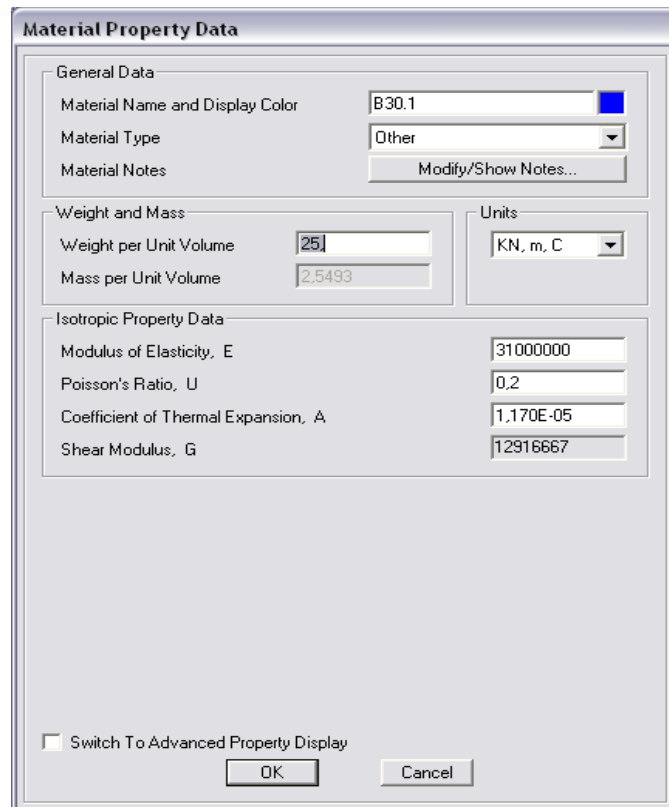
- Pré-Processamento, onde se vai desenhar o modelo, atribuir as características, colocar os esforços que actuam na estrutura, atribuir a malha e definir as condições de fronteira;
- Processamento, onde vai definir-se qual o tipo de análise a realizar e quais as características pretendidas nessa análise;
- Pós-Processamento, onde se vão analisar os resultados obtidos pelo programa após o modelo ter sido analisado.

Este capítulo vai focar-se no Pré-Processamento, onde se vão descrever e nomear as principais diferenças entre os dois programas em estudo, falando em algumas situações que não serão alvo de estudo e, por conseguinte, não terão desenvolvimentos mais à frente neste trabalho.

No ANSYS pode-se começar por desenhar a estrutura e mais tarde atribuir as características a cada elemento estrutural, ou de forma inversa, enquanto no SAP2000, normalmente, se definem primeiro as características a atribuir a cada elemento estrutural e só depois se desenha a estrutura, para que desta forma a estrutura fique logo com cada elemento estrutural devidamente definido. Naturalmente que no SAP2000 é possível fazer a modelação de modo inverso porém não se torna tão prático estar a definir as características elemento a elemento estrutural.

1. Definição de Materiais

No que diz respeito à definição de materiais, estes dois programas têm algumas semelhanças. Numa primeira abordagem, o SAP2000 tem uma lista de materiais na qual, depois de escolhido um componente dessa lista, se pode definir as características principais desse mesmo componente, como coeficiente de Poisson ou Modulo de elasticidade, isto tendo em consideração que se está a considerar um material isotrópico. Este menu é muito prático, uma vez que é bastante simples de utilizar e de chegar à definição do material pretendido. Na Figura 15 pode observar-se que existe um campo onde é permitido escolher directamente o material pelo nome como betão, aço, entre outros, de forma a ter já as características padrão e mais comuns preenchidas.



The image shows a 'Material Property Data' dialog box from the SAP2000 software. It is divided into three main sections: General Data, Weight and Mass, and Isotropic Property Data. The General Data section includes fields for Material Name and Display Color (set to 'B30.1' with a blue color swatch), Material Type (set to 'Other' in a dropdown), and Material Notes (with a 'Modify/Show Notes...' button). The Weight and Mass section has fields for Weight per Unit Volume (set to '25') and Mass per Unit Volume (set to '2.5493'), along with a Units dropdown (set to 'KN, m, C'). The Isotropic Property Data section contains fields for Modulus of Elasticity, E (set to '31000000'), Poisson's Ratio, U (set to '0.2'), Coefficient of Thermal Expansion, A (set to '1.170E-05'), and Shear Modulus, G (set to '12916667'). At the bottom, there is a checkbox for 'Switch To Advanced Property Display' and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Section	Property	Value
General Data	Material Name and Display Color	B30.1 (Blue)
	Material Type	Other
	Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	Weight per Unit Volume	25
	Mass per Unit Volume	2.5493
Weight and Mass	Units	KN, m, C
	Isotropic Property Data	
Isotropic Property Data	Modulus of Elasticity, E	31000000
	Poisson's Ratio, U	0.2
	Coefficient of Thermal Expansion, A	1.170E-05
	Shear Modulus, G	12916667

Figura 15 – Quadro básica de definição de materiais do SAP2000

Esta escolha directa não dá muita flexibilidade, porque por exemplo nos elementos de linha com o nome de material está directamente ligada a secção transversal mais comum. Por isso caso que se pretenda algo ligeiramente fora dos materiais estruturais de engenharia, é preciso escolher “other”.

Porém, as possibilidades deste programa não se ficam por aqui. Caso seja pretendido pelo utilizador um material de outra espécie, como por exemplo um anisotrópico, este programa tem um submenu (Figura 16) que possibilita a caracterização de diversos elementos para definir cada material, podendo mesmo definir dados não lineares dos materiais ou amortecimento, entre outras possibilidades.

The image shows the 'Material Property Data' dialog box in SAP2000. It is used to define the material properties for a selected element. The dialog is organized into several sections:

- Material Name:** A text field containing 'MAT-1'.
- Material Type:** A dropdown menu set to 'Steel'.
- Symmetry Type:** A dropdown menu set to 'Anisotropic'.
- Modulus of Elasticity:** A table with three rows (E1, E2, E3) and one column, all containing the value '29000'.
- Poisson's Ratio:** A table with three rows (U12, U13, U23) and one column, all containing the value '0.3'. Below these are additional rows (U14, U24, U34, U15, U25, U35, U45, U16, U26, U36, U46, U56) all containing the value '0'.
- Weight and Mass:** A section with two rows: 'Weight per Unit Volume' (2.836E-04) and 'Mass per Unit Volume' (7.345E-07). A 'Units' dropdown is set to 'Kip, in, F'.
- Other Properties for Steel Materials:** A section with four rows: 'Minimum Yield Stress, Fy' (36), 'Minimum Tensile Stress, Fu' (58), 'Effective Yield Stress, Fye' (54), and 'Effective Tensile Stress, Fue' (63.8).
- Coeff of Thermal Expansion:** A table with three rows (A1, A2, A3) and one column, all containing the value '6.500E-06'. Below these are additional rows (A12, A13, A23) all containing the value '0'.
- Advanced Material Property Data:** A section with four buttons: 'Nonlinear Material Data...', 'Material Damping Properties...', 'Time Dependent Properties...', and 'Thermal Properties...'.
- Buttons:** 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

Figura 16 - Quadro avançado de definição de materiais do SAP2000

No entanto, o ANSYS é mais abrangente, ultrapassando o SAP2000 no que diz respeito a todo o tipo de materiais que não sejam estruturais, pois o primeiro tem um maior conjunto de matérias que possibilitam definir fluidos entre muitos outros tipos (Figura 17). Assim a escolha de material efectua-se não pelo nome mas pelo tipo de material e de seguida pelo tipo de comportamento.

Figura 17- Quadro de definição dos materiais (ANSYS)

The image shows the 'Define Material Model Behavior' dialog box in ANSYS. It is used to define the material models for a selected element. The dialog is organized into two main sections:

- Material Models Defined:** A list box containing 'Material Model Number 1'.
- Material Models Available:** A list box containing a hierarchy of material models:
 - Favorites
 - Structural
 - Thermal
 - CFD
 - Electromagnetics
 - Acoustics
 - Fluids
 - Piezoelectrics
 - Piezoresistivity
 - Thermoelectricity

The dialog also includes a menu bar with 'Material', 'Edit', 'Favorite', and 'Help' options.

É ainda possível criar uma biblioteca de materiais mais utilizados, para se poder facilitar a introdução dos mesmos dados em vários modelos. Vários materiais já fazem parte integrante do programa ANSYS (directoria C:\Program Files\ANSYS Inc\v110\ANSYS\matlib).

Como os materiais utilizados no projecto do edifício do departamento de engenharia civil são materiais estruturais isotrópicos, estas funcionalidades mais abrangentes não serão alvo de maior estudo neste trabalho.

2. Elementos Finitos

Como o próprio nome indica, o MEF é um método que divide um domínio contínuo em vários subdomínios chamados elementos finitos. Sendo o modelo em estudo um modelo estrutural, onde se pode aplicar a redução dimensional, deve ter-se em atenção que o modelo é feito à linha ou superfície média de cada parte constituinte. Os elementos estruturais, pilares, têm duas dimensões pequenas relativamente à outra e representam-se pelas linhas rectas, as paredes e lajes, têm uma dimensão pequena relativamente às outras e representam-se pelas superfícies (áreas), no nosso caso de um edifício geralmente planas.

Para a realização do modelo, considera-se que as vigas e pilares são constituídos por elementos de linha, ou seja de barra ou viga apenas com dois nós, no que diz respeito às lajes e parede resistentes representam-se através de elementos de área, ou seja de laje ou casca, implementando preferencialmente os elementos quadriculares de quatro nós.

Como dados adicionais, é preciso definir a espessura dos elementos de laje ou casca. Para os elementos de barra/viga é preciso introduzir todos os dados que caracterizam a secção transversal. Aqui vai encontrar-se uma grande diferença nos dois programas. No SAP2000, quando se selecciona o menu para definir a secção, aparece um quadro com várias formas geométricas directamente ligadas ao tipo de material utilizado: nesta fase é necessário escolher a geometria da secção desejada (limitada às formas mais utilizadas), depois colocar as medidas requeridas e os cálculos das características da secção são feitos automaticamente. No ANSYS, a secção está ligada ao tipo de elemento mas não tem nenhuma ligação ao material utilizado. Para se conseguir a maior flexibilidade na utilização é necessário preencher todas as características da secção transversal separadamente, podendo ser necessário efectuar antes alguns cálculos (Figura 18).

Property	Value
Element Type Reference No. 1	1
Real Constant Set No.	2
Cross-sectional area AREA	0.18
Area moment of inertia IZZ	0.0054
Area moment of inertia IYY	0.00135
Thickness along Z axis TKZ	0.3
Thickness along Y axis TKY	0.6
Orientation about X axis THETA	0
Initial strain ISTRN	0
Torsional moment of inertia IXX	0
Shear deflection const Z SHEARZ	0
Shear deflection const Y SHEARY	0
Rotational frequency SPIN	0
Added mass/unit length ADDMAS	0

Figura 18 - Quadro de definição de secções no ANSYS

Apesar de a forma já descrita ser a mais abrangente, o ANSYS tem um módulo separado da definição das secções no qual, tal como no SAP2000, se podem definir as secções apenas pelas suas dimensões, sendo os restantes cálculos realizados automaticamente. Esta parte tem a sua principal utilidade nas secções de parede fina sujeitas à torção, que não é importante para o trabalho em estudo. É importante salientar que o ANSYS tem vários elementos de barra/viga e casca de acordo com as potencialidades necessárias em vários tipos de análise, no entanto o SAP2000 disponibiliza apenas um único elemento finito introduzido na malha sobre linhas e um único sobre áreas. Este facto disfarça o facto de ser o MEF utilizado na análise.

3. Geometria da Estrutura

O SAP2000, um programa mais virado para o utilizador menos experiente, vai formar as “**Grid Lines**” (Figura 19) delimitando a estrutura e representando os elementos-chave desta, tais como os pilares, centros geométricos de paredes resistentes e núcleos, tornando-se assim uma referência gráfica destes elementos. No que diz respeito ao ANSYS, as referências que o utilizador vai lançar inicialmente são os chamados “**Keypoints**”, que são os pontos-chave que localizam os limites da

estrutura e elementos estruturais. Estes pontos-chave, ao desenhar o modelo, vão fundir-se em linhas ou em áreas tal como se pretende, para que haja uma continuidade na estrutura.

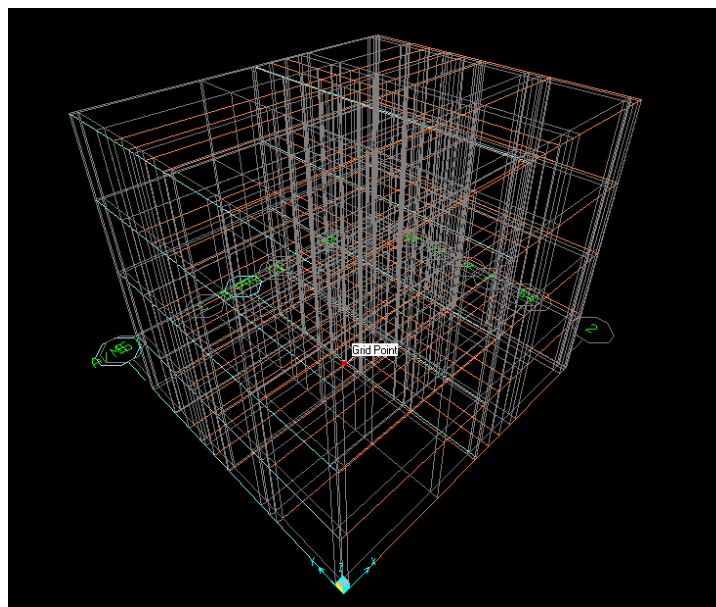


Figura 19 - Conjunto de “Grids”

É no desenhar o elemento de estudo que se encontram as diferenças mais marcantes para o utilizador destas ferramentas: enquanto no SAP2000 os comandos de desenho se encontram em forma de botões e o próprio programa auxilia com as “Grid lines”, no ANSYS o menu lateral vai abrindo submenus onde se pode encontrar os comandos que se deseja.

Em primeiro lugar deve ter-se em atenção que, tal como foi dito anteriormente, a modelação será feita à linha média da estrutura, ou seja, os pilares serão representados por uma linha no eixo central deste e as lajes por um plano na sua superfície média, portanto ao retirar as medidas de definição da estrutura deve ter-se em conta esta situação para se obter um modelo representativo da realidade.

Dado o modelo escolhido para a análise, os elementos estruturais verticais correspondem principalmente aos pilares (linhas) e os horizontais às lajes (áreas). Vamo-nos concentrar primeiro em elementos verticais. No que diz respeito ao desenho em SAP2000, vai-se desenhando a estrutura escolhendo os botões apropriados, depois surge um pequeno menu que nos possibilita escolher a secção e o material definido anteriormente. Após definidas estas propriedades, é só fazer um click na “grid line” onde se pretende que fique o elemento. Vai assim definir-se os elementos verticais da estrutura.

Para o ANSYS é necessário saber quais os “keypoints” que irão ser o início e o fim de cada pilar, parede ou laje, assim vai-se escolher o menu para desenhar as linhas e seleccionar o ponto de início e de final de cada pilar.

“Keypoints” são pontos-chave da estrutura, como início e final de pilares ou extremos de lajes, enquanto que “grid lines” são linhas de apoio ao utilizador que estão assentes em pontos-chave tal como os “keypoints”.

Em ambos os programas é necessário ter em atenção a orientação do desenho a fazer, uma vez que isso vai também determinar a orientação dada ao elemento (Figura 20) para fins de análise estrutural.

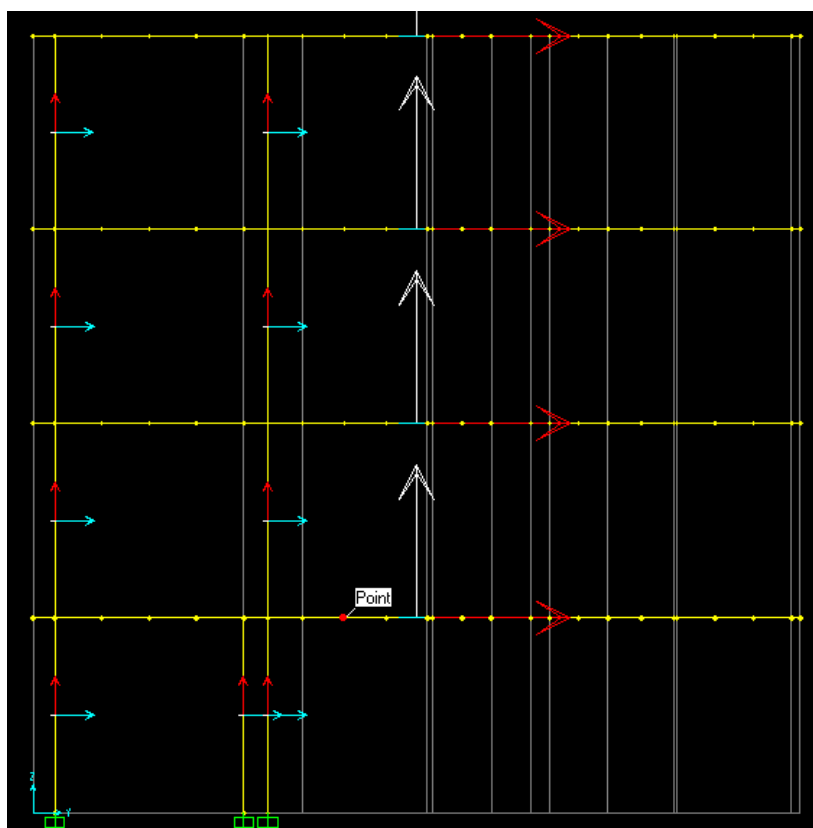


Figura 20 – Representação de eixos locais no SAP2000

Como se constatou no Capítulo I, é preciso respeitar a continuidade geométrica da estrutura. Por este motivo, tanto no SAP2000 como no ANSYS o desenhar dos elementos horizontais deve ser feito formando áreas que abranjam todos os “keypoints” dos pilares, para que desta forma se possa representar uma única área contínua e ligada aos elementos verticais.

Também aqui, a orientação com que se desenha cada área é decisiva para definir a orientação do elemento. No que diz respeito ao ANSYS o procedimento de criação de cada área define “top” e “bottom”, o que pode ser decisivo para a aplicação da carga. Deve desenhar-se no sentido anti-horário, apesar de não ser obrigatório torna-se mais vantajoso, porque assim o “top” e o “bottom” das áreas horizontais corresponde ao “top” e bottom” da visualização. Uma vez que se os elementos forem desenhados com geometrias diferentes o sistema de eixos desse elemento não será o mesmo em todos os elementos. Para solucionar isso, devem-se então formatar os sistemas locais de eixos para que fiquem todos equivalentes e os resultados das análises futuras em termos de esforços sejam representados no mesmo referencial.

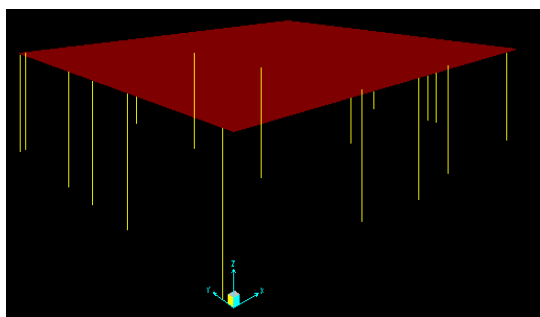
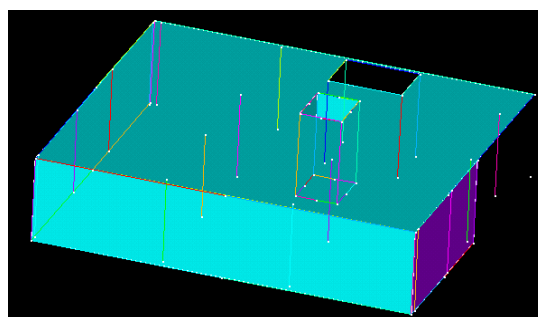


Figura 21- Modelo do primeiro piso em SAP2000

Figura 22 - Modelo do primeiro piso em ANSYS



Ainda para a definição da estrutura não se pode esquecer das paredes resistentes, que são realizadas de maneiras semelhantes nos dois programas.

Nesta fase, já com a geometria e características de materiais do piso térreo definidas, pode-se copiar todos os elementos tantas vezes quantas as que forem necessárias para que se consiga reproduzir o

edifício completo (Figura 23). É de notar que isto só é possível quando o edifício é igual de piso para piso.

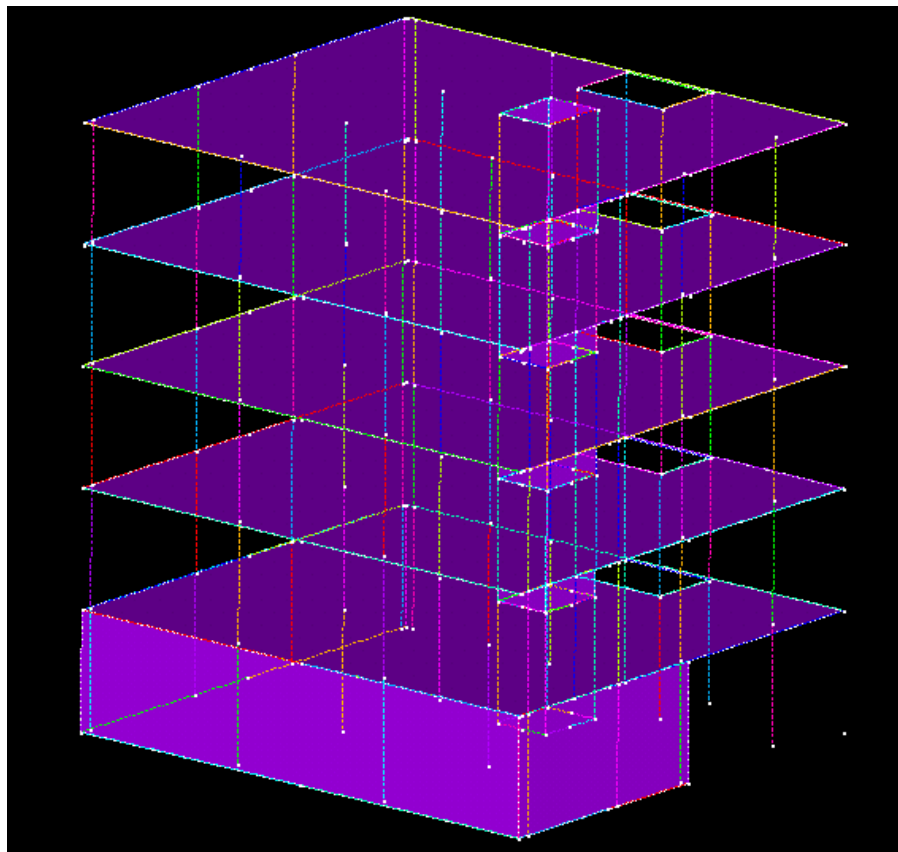


Figura 23 - Modelo completo em ANSYS

No SAP2000, uma vez que estes novos elementos vão assentar sobre as “grids” já criadas, não será necessário realizar mais nenhuma acção para garantir que a estrutura é contínua. Por sua vez, no ANSYS, que copia integralmente todos os elementos, vai ser necessário dar ordem ao programa para que todos os “keypoints” que se encontrem sobrepostos passem a ser apenas um, porque desta forma consegue garantir-se que nos elos de ligação da estrutura não há descontinuidades. Ligando os “keypoints” ligam-se automaticamente linhas e áreas. No caso do SAP2000 não será necessário realizar nenhuma actividade extra uma vez que este considera que os nós que se encontrem no mesmo local em cima da “grid line” é o mesmo, assim não vai permitir a existência deste tipo de descontinuidade.

4. Apoios e Ligações

Após o edifício estar completo em altura e de se garantir que não existe nenhuma descontinuidade nos pontos de ligação da estrutura, é chegada a altura de simular a ligação e os apoios da estrutura à terra (Figura 24), neste caso por meio de encastramentos. Não levando em conta as diferenças de menu, pode afirmar-se que neste ponto os dois programas se comportam de forma idêntica e bastante simples, uma vez que para realizar esta acção apenas tem de se limitar todos os movimentos dos pontos e linhas seleccionados à partida.

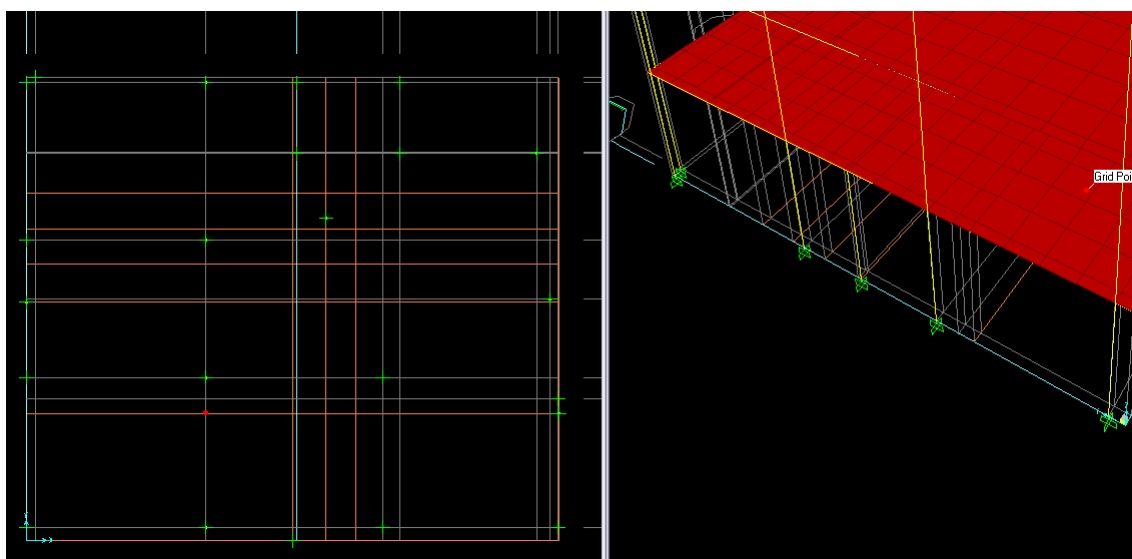


Figura 24 – Duas vistas no ambiente de trabalho do SAP2000

5. Malha

Agora, e uma vez que se pode desde já começar a analisar a estrutura, é necessário criar a malha de elementos finitos que constituirá a base de todas as análises. Vai-se então dar ordem aos dois programas para definir o máximo lado do elemento, já se sabe à partida que quantos mais elementos existirem melhor e mais precisa é a análise. No entanto, assim serão necessários mais recursos, pelo que será preciso arranjar uma solução intermédia que nos leve a uma boa análise sem consumir recursos desnecessários. Também esta acção é bastante semelhante nos dois programas, ambos utilizam as divisões feitas na modelação, dividindo essas linhas na dimensão introduzida pelo utilizador. No entanto é preciso de salientar que a criação de malha no ANSYS é mesmo indispensável (mesmo a visualização é feita de maneira diferente para visualizar por exemplo uma linha e uns

elementos de linha) não podendo fazer uma análise sem ter a malha. No SAP2000, no entanto, sempre existe uma malha grossa por defeito, o que poderá despistar utilizadores menos experientes que deste modo encontrarão resultados pouco próximos à realidade, sem se aperceberem da razão deste facto.

Uma vez que é aconselhável poupar os recursos que o programa deve utilizar, a malha deve ser gerada de uma maneira coerente, refinando a malha nos locais onde os esforços serão mais significativos e ficando com uma malha mais espaçada nos locais menos significativos de esforços.

Para a realização da malha em lajes podem considerar-se elementos de três nós, triangulares, ou elementos de quatro nós, quadrangulares (Figura 25). Para a escolha da malha devem ter-se em atenção alguns factos no comportamento desta: para elementos triangulares nas lajes o comportamento é mais rígido, o que torna os elementos com quatro nós mais apropriados para o estudo destes elementos estruturais e foram estes os escolhidos para a criação da malha. Porém, mesmo em elementos de quatro nós, para evitar erros numéricos deve ter-se em atenção que os elementos de ângulos muito abertos ou muito fechados também acumulam erros numéricos.

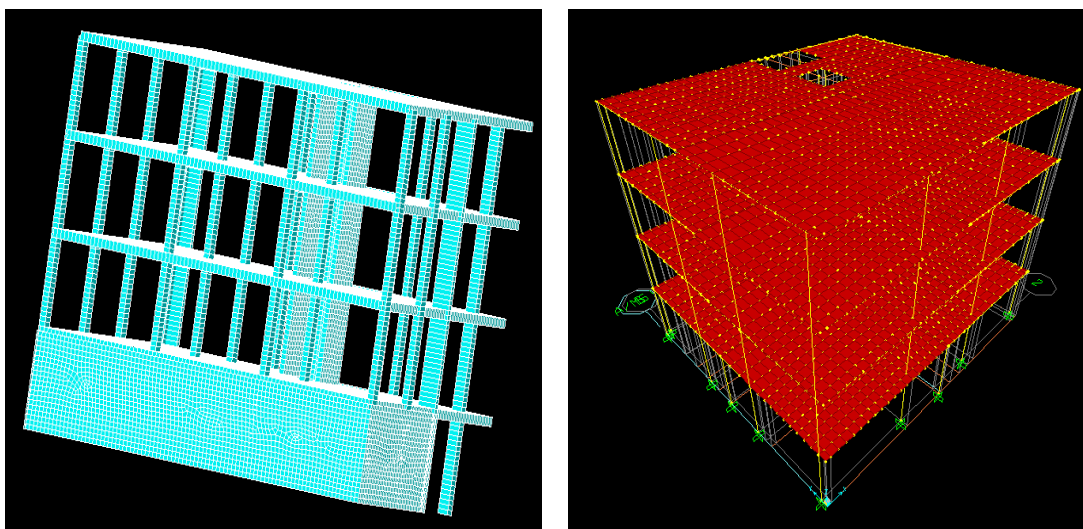


Figura 25 – Modelo já com malha

6. Carga

As cargas a aplicar na estrutura vêm substituir a reacção de alguns materiais que não são simulados na modelação. Desta forma pode considerar-se o peso próprio dos elementos estruturais, o peso dos elementos de revestimento e a sobrecarga de utilização. Neste caso deve-se ter em atenção que para

a análise estática este método de simulação do peso dos materiais de construção é eficaz, porém —
para uma análise dinâmica o comportamento não é o mesmo (Figura 26) uma vez que — :

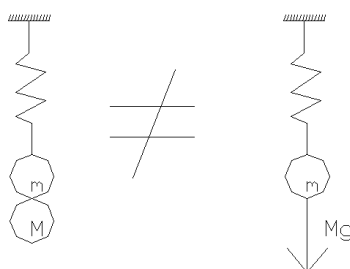


Figura 26 - modelo de massas

Nesta área existem também diferenças visíveis entre os dois programas.

No programa SAP2000, ao definir o modelo vão-se atribuir características aos materiais que serão utilizados pelo programa a fim de aferir o peso próprio de todos os elementos estruturais e consequentemente o peso de toda a estrutura. Os materiais que irão constituir peso à estrutura, como por exemplo os revestimentos e paredes divisórias bem como as sobrecargas de utilização, são representados por meio de cargas verticais nos locais devidos. Existe um menu onde se podem fazer as combinações que se deseja, assim para cada combinação é preciso atribuir as cargas que se pretende considerar e fazer-lhe corresponder o factor de majoração, e ainda escolher um parâmetro que indica se se deve considerar a massa correspondente desta carga no cálculo das frequências, sendo depois a análise feita para cada combinação e os resultados apresentados independentes do resto das combinações. No SAP2000 é também possível através de um menu chamado “mass source” a introdução dos valores de coeficiente Ψ referentes a cada carga para desta forma se chegar automaticamente aos valores reduzidos que se pretende para cumprir o disposto no RSA. O programa está assim virado directamente aos problemas dos engenheiros civis, usando os coeficientes directamente da regulamentação em vigor. No entanto o facto de se poder automaticamente aumentar a massa devido às cargas, disfarça o conhecimento teórico que as frequências de uma estrutura não são afectadas pelas cargas aplicadas.

Para o ANSYS, a colocação das cargas é feita de forma semelhante ao referido para o SAP2000, porém as diferenças essenciais encontram-se na necessidade de combinar estas cargas de modo a cumprir os regulamentos e desta forma majorar directamente o valor da carga a aplicar pelo coeficiente correspondente. O peso é preciso definir pelo vector de aceleração e às cargas nunca serão automaticamente atribuídas as massas correspondentes para as acrescentar à massa da

estrutura definida pela sua geometria. O peso próprio poderá ter qualquer direcção ou pode nem ser considerado, esta diferença já se notou na introdução dos materiais, onde o ANSYS solicita densidade de material em unidade kg/m^3 no entanto o SAP2000 peso volúmico em unidade N/m^3 (Figura 15).

O processo descrito anteriormente para o SAP2000 tem de ser feito de uma forma mais complicada no ANSYS ou seja, é necessário realizar as combinações manualmente e gravá-las em ficheiros separados de “load cases”. Torna-se depois impossível analisar os resultados de cada combinação de cargas, quando se consideram análises diferentes. É por isso preferível gravar cada análise diferente em “jobname” diferente. Na Figura 27 mostra-se um caso de cargas aplicadas em ANSYS.

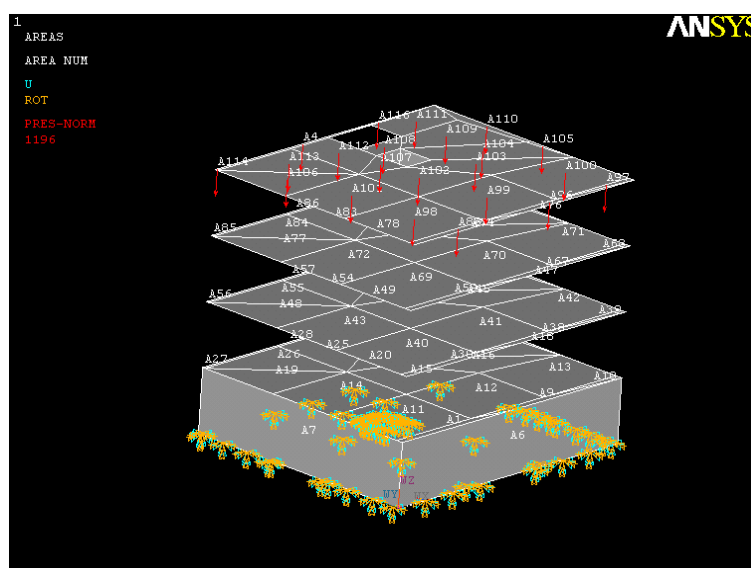


Figura 27 – Modelo em ANSYS com as Cargas da Cobertura Colocadas

7. Considerações Gerais do Trabalho

É preciso salientar que o ANSYS tem um menu principal muito bem dividido, formando vários grupos principais (Figura 28), cada um com a sua função distinta. Ou seja, dentro de cada menu podem-se encontrar as funcionalidades de cada acção, enquanto o SAP2000 divide os seus menus por actividades (definir, desenhar...).

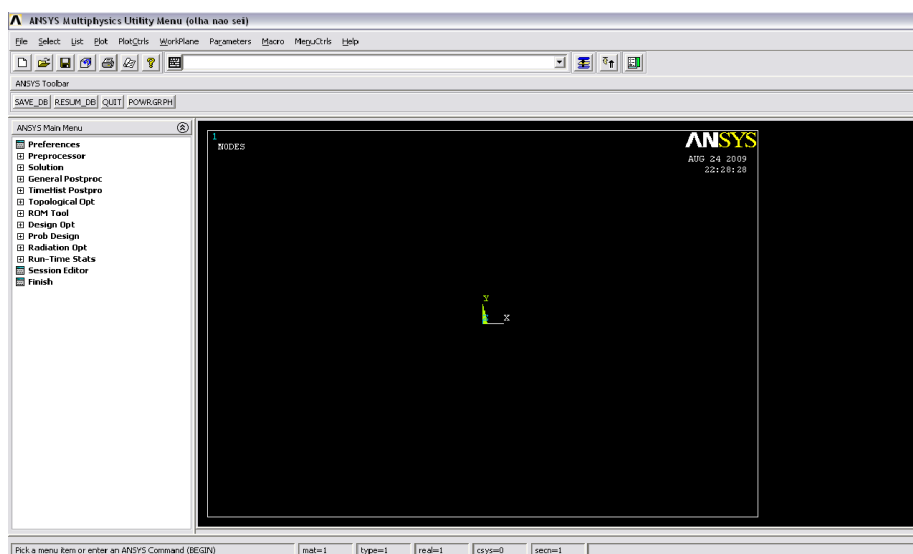


Figura 28 – Ambiente de trabalho do ANSYS

Além dos menus já falados, o ANSYS tem um pequeno menu complementar, por meio de botões, que permite um acesso mais rápido e prático às funções das vistas e movimentos dentro do plano. É sem dúvida uma ferramenta muito útil para trabalhar neste programa. O ANSYS contém nas suas funções uma ferramenta relativamente recente, chamada “Workbench”, que torna a utilização mais simples e facilita o trabalho de utilizadores menos experientes mas que não será analisada no âmbito deste trabalho.

Visualmente falando, as distinções entre estes dois programas são inúmeras, mas é na área de trabalho que estas se tornam óbvias.

A organização dos planos e vistas que se consegue no SAP2000 (Figura 29) tornam a utilização e o trabalho limpos, organizados e fáceis. Como nos é permitido dividir o ecrã em dois, pode-se utilizar duas vistas da mesma estrutura ao mesmo tempo, localizando o local em que nos encontramos a trabalhar por meio de um pequeno ponto vermelho, o que permite acompanhar em tempo real o nosso trabalho sob várias perspectivas ou mesmo em 3D, tendo a plena noção dos erros cometidos.

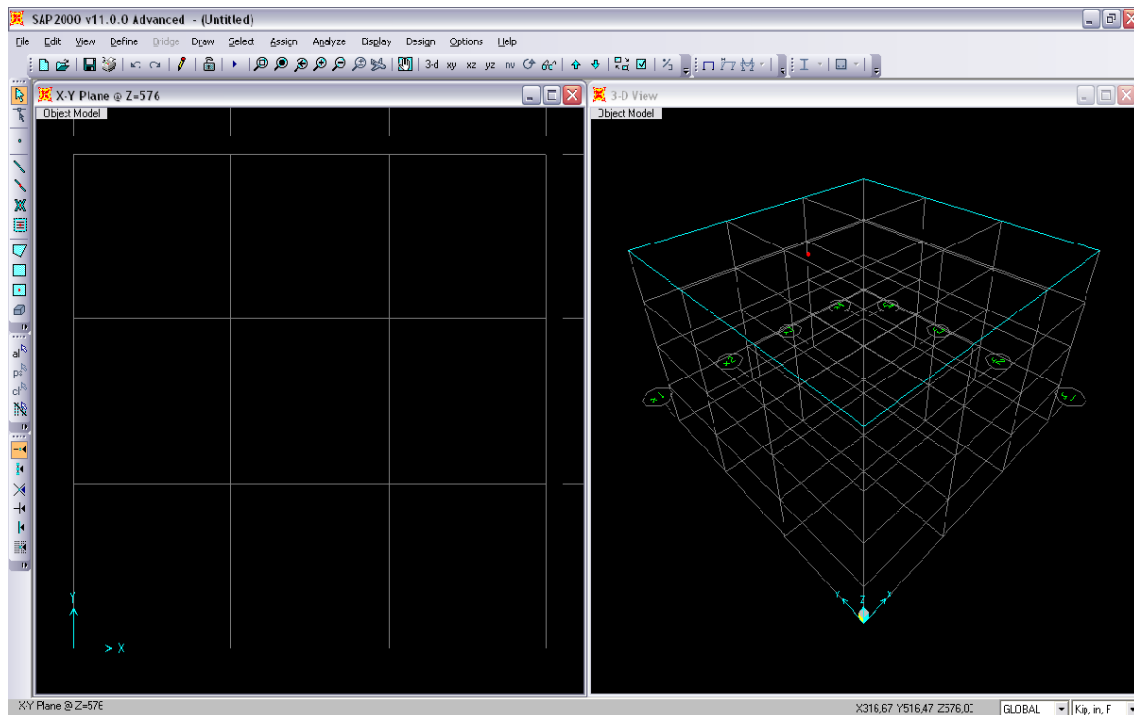


Figura 29 - Ambiente de trabalho do SAP2000

Neste programa existe também a facilidade de trabalhar em planos diferentes, podendo variar a posição do plano nos eixos para uma melhor visualização do modelo. Isso, juntamente com a existência de “grids”, garante que o desenho de cada elemento é feito no local certo. Todas estas funcionalidades facilitam muito o trabalho do utilizador. Existe ainda um conjunto de acções que este programa efectua que ajuda na visualização do modelo e mais tarde na visualização dos gráficos de análise, tal como a possibilidade de ver a estrutura em 3D em qualquer altura da modelação, a orientação das barras, etc.

Como foi referido anteriormente, no ANSYS a orientação é feita por meio de pontos (“keypoints”), ou seja: visualmente falando, no início tem-se apenas uma tela preta cheia de pontos numerados (Figura 30) que a nível organizacional torna tudo mais confuso, uma vez que é complicado localizar à partida onde se deve desenhar o que mais tarde serão os elementos estruturais. Por este motivo, logo à partida é necessário um método de trabalho e organização mais sistematizado para que seja possível desenhar as linhas e planos através dos números dos pontos.

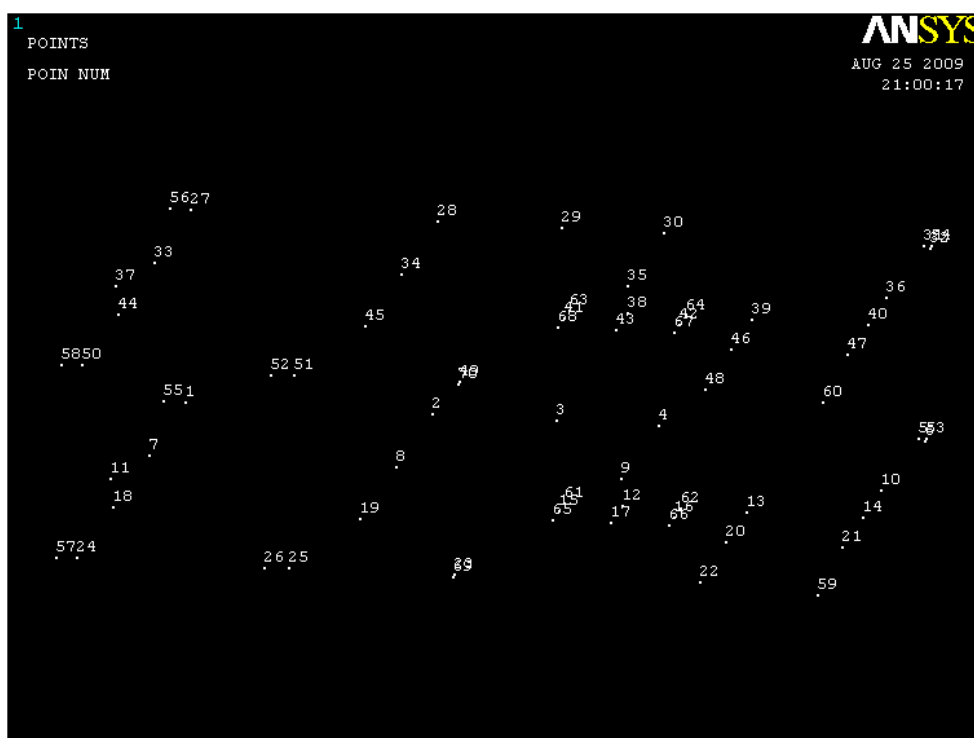


Figura 30 – Apresentação dos “keypoints” em ANSYS

Para nos movermos na área de trabalho, o pequeno menu de botões que já se referiu anteriormente é uma ferramenta fundamental, sem a qual o trabalho se tornaria muito complicado. Através dele é possível manobrar a estrutura como se quisesse, para desta forma conseguir encontrar os pontos e linhas desejadas para desenhar os elementos da estrutura (também com os botões do rato se tem facilidade com o movimento do plano de trabalho).

Uma vez que o ANSYS desenha a linha média da secção, só é possível ver a representação do modelo através de linhas e áreas. Isto também acontece com o SAP2000, mas este tem a funcionalidade já referida, que torna possível ver a qualquer altura o desenho dos pilares com as suas dimensões das secções transversais e espessura das paredes e lajes, como se mostra na Figura 31. No ANSYS, para se poder ver um desenho semelhante, é necessário primeiro atribuir uma malha, o que leva a um gasto de recursos desnecessário, já que pode não ser utilizada na análise que irá a seguir.

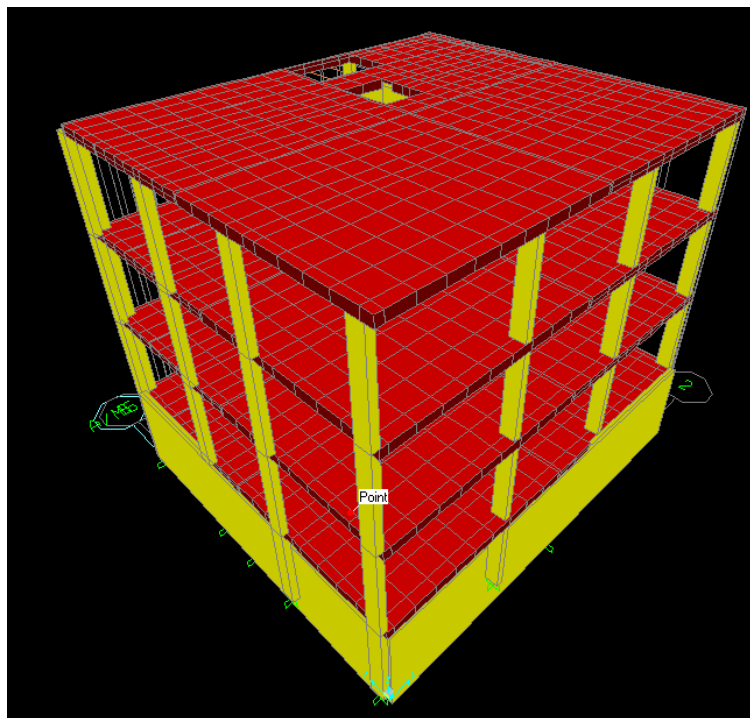


Figura 31 – Modelo em SAP2000

Ao modelar o mesmo edifício nestes dois programas de cálculo de estruturas, tive a oportunidade de navegar por cada um deles para efectuar as mesmas tarefas. Por este motivo, pude ver as facilidades, as dificuldades, os pontos a favor e os pontos a desfavor de cada uma destas ferramentas que descrevi neste capítulo.

É preciso salientar que ambos os programas têm inúmeras funções e que nem todas foram referidas: foram exploradas as necessárias para a modelação e algumas adicionais que não foram utilizadas neste trabalho, uma vez que o tempo para a realização do mesmo não o permitia. Assim, algumas das funcionalidades ou menus podem ter falhado por não se encontrarem localizados de forma mais acessível.

É também de salientar que, antes de iniciar este trabalho frequentei um curso que me deu as bases para a utilização do SAP2000, pelo que a preparação era maior quando comparando com a utilização ANSYS, do qual sou autodidacta, o que pode ter levado a uma maior resistência na utilização desta ferramenta.

Numa breve conclusão, posso dizer que o SAP2000, por ser um programas mais intuitivo e com uma apresentação mais limpa e de fácil utilização, torna-se o programa mais virado para um utilizador menos experiente. Porém, é necessário ter atenção quando se pretende realizar um trabalho mais minucioso e complexo, pois, como qualquer programa, não faz nada sozinho e obriga o utilizador a conhecer bem a matéria que está a tratar para poder simular algumas situações que o programa não

permite fazer de uma forma directa, mas que se pode simular por meio de ferramentas de que o programa dispõe para chegar a comportamentos idênticos àqueles que são desejados.

Por outro lado, a experiência que tive com o ANSYS leva-me a acreditar que este programa é mais confuso no que diz respeito à utilização e navegação. Apesar de uma lógica organizacional muito bem estruturada, à partida é uma ferramenta mais complexa e que exige do seu utilizador um forte conhecimento da lógica do programa.

Apesar de um programa menos apelativo e menos intuitivo, este é mais abrangente e generalista que o SAP2000. Não se tratando de um programa dirigido à modelação de estruturas para engenharia civil, torna-se necessário especificar as características e objectivos de tudo o que se pretende, o que na maior parte das vezes não acontece no SAP2000 porque este já tem nas suas definições essas mesmas características.

Não se pode esquecer de uma das ferramentas mais úteis do ANSYS: refiro-me à “Help” (Figura 32), que neste caso é sem dúvida uma grande ajuda, uma vez que não auxilia só à compreensão do programa em si mas explica também as bases científicas do que se procura, mostrando fórmulas, desenhos, etc.

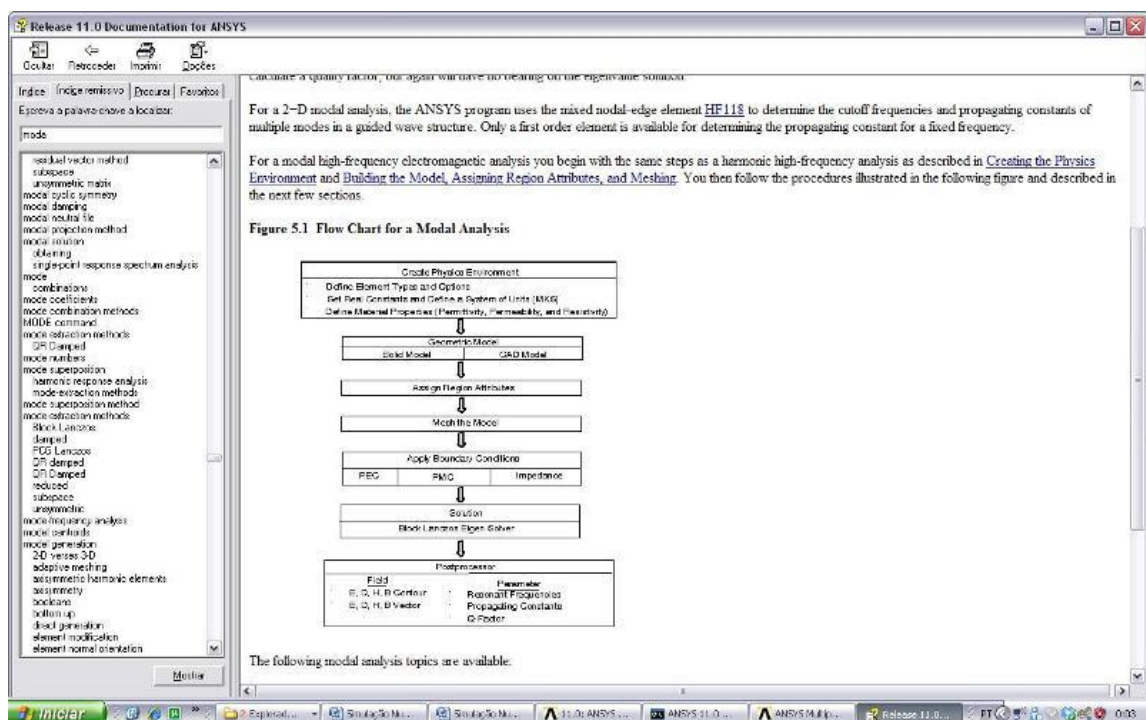


Figura 32 – Janela da ajuda do ANSY

Capítulo IV - Ensaios e Análises de Resultados

Introdução

Neste capítulo vão realizar-se as análises propostas neste trabalho, bem como a apresentação dos resultados de cada análise em ambos os programas alvo de estudo.

Como foi referido no Capítulo III esta fase de estudo tem como nome “processamento” e é onde se trata de definir quais as análises que se irão realizar bem como as características de cada análise. É nesta fase que se escolhe por exemplo quantos modos de vibração é que o programa vai analisar.

Também neste capítulo e para uma melhor leitura deste trabalho, vai-se juntar a fase do pós-processamento, que é onde são apresentados os resultados das análises, bem como todos os gráficos e tabelas de auxílio a visualização destes mesmos resultados.

Na realização do Capítulo III, foram descritas diversas ferramentas que por algum motivo não tiveram utilidade neste trabalho. Neste capítulo apenas se irá falar do que foi utilizado para a realização das análises ou estudo de resultados, por este motivo não vai ser abrangido diversas ferramentas e funcionalidades nem do ANSYS nem do SAP2000.

1. Processamento – Introdução

Depois de se realizar o modelo que será o alvo de estudo, é chegada a hora de compreender qual vai ser o seu comportamento às diversas acções a que o edifício será sujeito, desde o seu peso próprio até ao comportamento que a estrutura terá quando solicitado por forças horizontais provenientes de um sismo.

Para este estudo de comportamentos é necessário realizar diversas simulações consoante a análise que se quer fazer e é na fase de processamento que se vão definir as suas características.

Como já foi dito anteriormente, tanto o ANSYS como o SAP2000 são apenas ferramentas que auxiliam os estudos e facilitam a vida dos utilizadores, porém deve ter-se consciência que estes programas fazem apenas os que o projectista dá ordem para fazer e portanto este deve ter em

atenção que os Programas têm limitações. Com base nestes factos o utilizador deve ter sempre um olhar crítico sobre os resultados.

Foi proposto para este trabalho uma comparação entre dois Programas comerciais, ANSYS e SAP2000, como base nos comportamentos e resultados da mesma estrutura com as mesmas características modeladas em separado nos dois programas.

Para cumprir o propósito deste trabalho foi necessário escolher um tipo de análise para servir de base: foi então seleccionada a análise sísmica por espectros de resposta. Uma análise sísmica de uma estrutura é uma análise ao comportamento da estrutura quando solicitado a uma força horizontal na base, causada por um sismo. Para este estudo foi utilizado o Regulamento de Segurança e Acções (RSA) uma vez que na fase de projecto, do edifício que serviu de base do estudo deste trabalho, era este o regulamento em vigor. Desta forma pretende-se que o modelo e as análises sejam semelhantes às utilizadas pelo projectista.

Para a realização da análise espectral é necessário ter por base duas outras análises muito importantes para o conhecimento da estrutura em estudo: a análise estática e a análise modal, que na linguagem dos programa comercial significa apenas extracção dos modos de vibração para uma posterior utilização. É com os valores destas últimas duas análises que vai ser possível realizar a análise sísmica por espectro de resposta, uma vez que se pretende obter os valores máximos de determinados esforços e estes são obtidos através de uma combinação dos modos de vibração.

Assim para a realização deste trabalho vão realizar-se três análises que servirão de apoio à comparação destas duas ferramentas no que diz respeito aos resultados apresentados.

2. Análise Estática

Uma análise estática estuda o comportamento da estrutura relacionada com as cargas que não variam ao longo do tempo.

Devem ser consideradas nesta análise as cargas permanentes, ou seja, as cargas que não variam ou que variam muito pouco ao longo do tempo e as sobrecargas de utilização, ou seja, as cargas que se considera que irão existir devido às características de utilização do edifício (tipo de mobiliário, tipo de máquinas, etc.).

As cargas permanentes estão directamente relacionadas com o peso dos materiais constituintes do edifício, como o betão armado da estrutura, o peso dos revestimentos, o peso próprio das paredes interiores e exteriores. No Capítulo II foi apresentado o quadro onde se podem ver os valores considerados em projecto (Tabela 3, página 20) para cada um destes elementos e por conseguinte os valores que foram utilizados para a modelação deste edifício.

As sobrecargas são cargas que estão directamente ligadas à utilização da estrutura, não sendo cargas fixas e portanto podem variar ao longo do tempo, são cargas que se espera estarem presentes e sejam constantes durante a utilização do edifício para a actividade proposta, estas cargas estão associadas aos mobiliários, ao nível de utilização, etc. No caso deste projecto foram considerados os seguintes valores de sobrecargas (SC): 3 kN/m^2 nos pisos de escritórios e 1 kN/m^2 no caso da cobertura.

A simulação destas cargas nos programas de cálculo foi feita a partir de cargas aplicadas nos locais onde seria esperado que estas estivessem.

Esta análise é utilizada para uma avaliação dos efeitos estruturais das acções na estrutura e pode ser feita [RSA] a partir de uma combinação fundamental (Equação 14), sendo a acção base a sobrecarga.

(14)

Em que:

- é o coeficiente de segurança que majora as cargas consoante o tipo de acção, neste caso o peso próprio;

- S_g é o peso próprio da estrutura;
- γ é o coeficiente de segurança que majora as cargas consoante o tipo de acção, neste caso a sobrecarga;
- S_q é a sobrecarga;
- S_d é o resultado da carga combinada.

Para o efeito de comparação foi escolhido o valor S_d , ou seja, a reacção total vertical.

Assim na Tabela 4 pode-se ver o cálculo das Cargas permanentes da estrutura dividido pelos vários pisos:

Tabela 4 – Resumo dos cálculos da Carga Permanente da Estrutura

	1º Piso	2º Piso	3º Piso	4º Piso	Cobertura
G laje [kN]	-	2400,582	2400,582	2400,582	2400,582
G revestimentos [kN]	-	307,275	307, 275	307, 275	307, 275
G paredes ext [kN]	-	410,625	410,625	410,625	NA
G paredes int. [kN]	-	640,1553	640, 1553	640, 1553	NA
G elem. verticais [kN]	1703,247	514,235	514,235	514,235	-
Total [kN]	1703,247	4272,8713	4272,8713	4272,8713	2707,8565

Estes valores foram calculados à mão usando apenas uma folha de cálculo Excel, considerando a área de cada piso com um valor de $256,0621\text{m}^2$, calculada através de cálculos simples (Tabela 5):

Área	
Planta [m^2]	268,515
Caixa de Elevador [m^2]	4,4969
Caixa de Escadas [m^2]	7,956

$$268,515 - (4,4969 + 7,9560) = 256,0621\text{m}^2$$

Tabela 5 – Cálculo da área de cada piso

Assim sendo tem-se na Tabela 6 o valor total a considerar das cargas permanentes e cargas de utilização.

Tabela 6 – Total de Carga e Sobrecarga da Estrutura

	G	SC
Total da Estrutura [kN]	17229,72	2816,68

Utilizando a equação 10,

$$S_d = 1,35 \times 17229,72 + 1,50 \times 2816,68 = 27485,129 \text{ kN}$$

Chega-se então ao valor através do cálculo à mão, valor este que irá ser comparado com o valor da reacção total de cada um dos programas em estudo.

2.1. SAP2000 - Análise Estática

Retirando os resultados da combinação estática obtidos através do programa SAP2000, obtém-se um $S_d = 27.467,78 \text{ kN}$ que conduz a uma diferença de 0,063% quando comparado pelo método de cálculo à mão, diferença que será explicada mais à frente neste capítulo.

A Tabela 7 apresenta valores retirados do programa SAP2000 para 2 pilares escolhidos aleatoriamente no modelo para desta forma se poder comparar melhor os resultados fornecidos.

Tabela 7 - resultados do SAP2000

SAP2000	PA1	Cota	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
		0,0	-112,096	-0,038	-4,315	-3,134	-0,976	-0,802
		3,9	-91,353	0,044	1,335	-0,968	0,813	-0,596

SAP2000	PA4	Pilar	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
		0,0	-429,786	0,001	2,788	3,220	-4,616	-5,976
		3,9	-409,253	0,001	2,788	-7,652	-4,616	12,027

Na tabela anterior observa-se os valores dos diversos esforços nas diversas direcções em cada pilar:

- Esforço axial (N)

- Torção (T)
- Esforço transversal segundo a direcção x (V3)
- Esforço transversal segundo a direcção y (V2)
- Momento Flector segundo a direcção y e x (M2 e M3, respectivamente)

2.2. ANSYS - Análise Estática

Retirando os resultados da combinação estática obtidos através do programa ANSYS, obtém-se um $S_d = 27.469,00\text{kN}$ que conduz a uma diferença de 0,091% quando comparado pelo método de cálculo à mão.

Na Tabela 8 pode-se ver os resultados fornecidos pelo ANSYS nos mesmos pilares que foram escolhidos anteriormente para representar o programa SAP2000.

Tabela 8 - Resultados do ANSYS

ANSYS	PA1	Pilar	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
		0,0	-101,130	-1,072	-8,683	-4,386	-0,619	-0,220
		3,9	-79,444	4,001	18,648	-0,022	17,343	-0,602

ANSYS	PA4	Pilar	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
		0,0	-430,210	0,004	3,988	5,459	-13,324	-17,141
		3,9	-415,000	0,004	3,988	-10,095	-13,324	34,824

2.3. Análise Estática - Resumo

Para este trabalho, esta análise, foi realizada por dois meios diferentes: SAP2000 e ANSYS. Foi ainda calculado o valor da reacção vertical total através do cálculo à mão.

Como foi referido neste capítulo, o carregamento utilizado na análise estática corresponde a combinação entre as cargas permanentes e as sobrecargas de utilização, sendo cada uma destas

majorada por um factor previsto no RSA para que desta forma se garanta que a estrutura é dimensionada pelo lado da segurança.

Para se fazer esta análise no SAP2000 é necessário definir a combinação fundamental. Estando o modelo completo já com as cargas aplicadas nos locais certos, o utilizador tem apenas de configurar o programa de modo a definir quais as cargas a considerar para esta combinação e qual o factor de majoração a aplicar a cada uma dessas cargas. Depois de definidos estes parâmetros, o programa analisa a estrutura e fornece os resultados da análise linear elástica.

Pode-se ver que, para o SAP2000 (Figura 33), o valor global destas cargas aplicadas na estrutura quando é feita esta análise é de 27.467,78kN, existindo um desvio associado de 0,063% relativamente ao cálculo à mão.

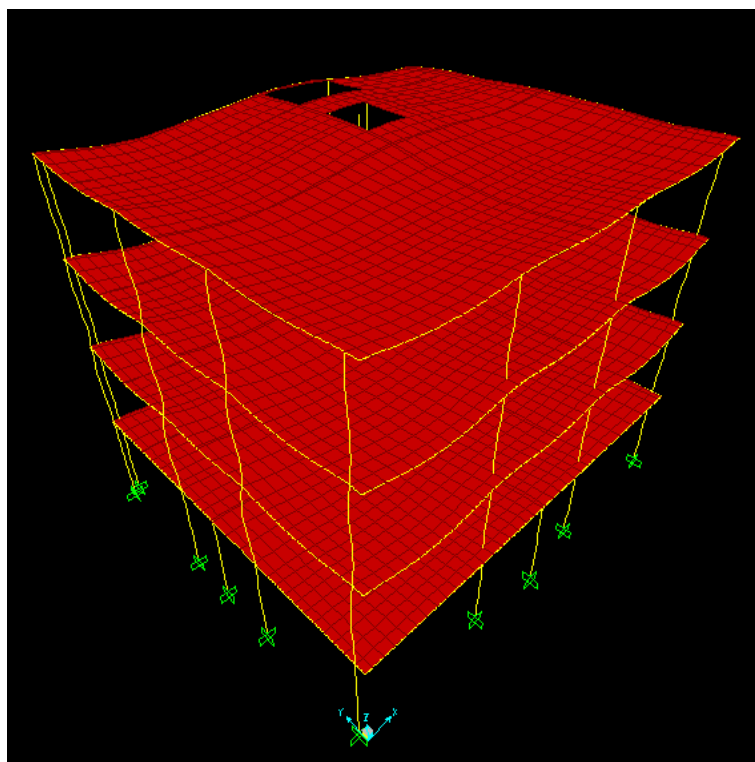


Figura 33 – Deformada da estrutura causada pela combinação Estática pelo programa SAP2000

No ANSYS, o modo de realizar esta análise é um pouco diferente relativamente ao SAP2000 uma vez que neste programa a carga que se vai aplicar à estrutura já tem que ser com a combinação das várias cargas feita, ou seja, ao aplicar a carga no modelo esta já deve ter a majoração necessária para cumprir o regulamento em questão. Porém, é necessário ter em atenção que esta ferramenta já tem

o valor do peso próprio, por este motivo tem de se colocar apenas o valor correspondente à majoração desta carga.

O valor da reacção total obtido com esta análise no software ANSYS (Figura 34) foi de 27.469,00kN, o que difere 0,091% relativamente ao método analítico.

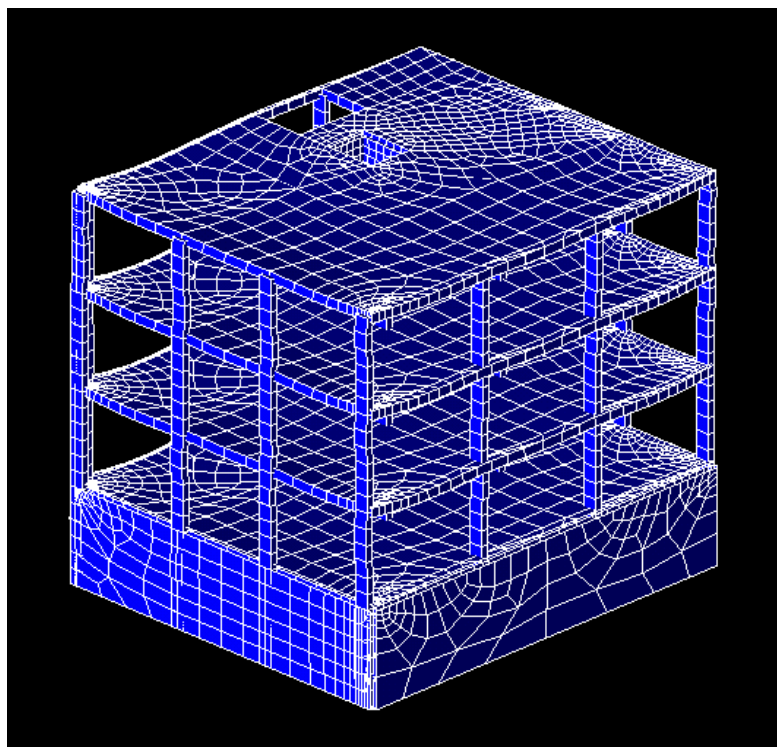


Figura 34 - Deformada da estrutura causada pela combinação Estática pelo programa ANSYS

Comparando agora os resultados entre as duas ferramentas de auxílio alvo deste estudo, estas têm uma diferença global dos esforços criados pela combinação estática de 0,028%. Apesar de ser um erro muito pequeno, pode-se associar ao facto de a introdução das combinações serem realizadas de forma diferente e que podem advir daí algumas diferenças no resultado final.

Neste ponto pode ver-se que, em termos de cálculo, estes dois programas têm resultados muito semelhantes.

Tabela 9 - Comparação de Resultados na análise estática

		Cota	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
PA1	SAP2000	0,0	-112,096	-0,038	-4,315	-3,134	-0,976	-0,802
	ANSYS	0,0	-101,130	-1,072	-8,683	-4,386	-0,619	-0,220
	SAP2000	3,9	-91,353	0,044	1,335	-0,968	0,813	-0,596
	ANSYS	3,9	-79,444	4,001	18,648	-0,022	17,343	-0,602
PA4	SAP2000	0,0	-429,786	0,001	2,788	3,220	-4,616	-5,976
	ANSYS	0,0	-430,210	0,004	3,988	5,459	-13,324	-17,141
	SAP2000	3,9	-409,253	0,001	2,788	-7,652	-4,616	12,027
	ANSYS	3,9	-415,000	0,004	3,988	-10,095	-13,324	34,824

Ao observar a Tabela 9 vê-se que existem algumas diferenças nos esforços dos pilares apresentados, estas diferenças apesar de provavelmente não terem expressão no dimensionamento destas peças estruturais, por terem diferenças baixas, não deveriam existir uma vez que é o mesmo modelo executado da mesma forma, mas em dois programas diferentes.

Podem justificar-se estas diferenças, logo à partida, devido à existência de diferenças no valor global das cargas estáticas, que naturalmente irá fazer com que a distribuição das cargas aplicadas em cada pilar sejam diferentes de programa para programa. Igualmente, como a malha dos elementos finitos em cada piso não está coincidente nos dois programas analisados, esta diferença pode implicar diferenças na atribuição da carga e peso em cada piso aos pilares. A malha das lajes foi feita por cada programa aleatoriamente, e apesar de ter sido introduzida a máxima dimensão do lado do elemento finito igual nos dois programas, os nós foram dispersos pela estrutura de uma forma diferenciada nos dois programas

Outra diferença que existe entre os dois programas é a aplicação da majoração das cargas, no SAP2000 uma vez que é feito de uma forma automática esta majoração é aplicada no local exacto onde existe, por sua vez, no ANSYS a majoração foi calculada e aplicada na laje de cada piso. Esta diferença de localização de carga devido à majoração leva a diferenças na distribuição dos esforços.

Para se poder observar este facto de uma forma mais expedita, podem-se comparar os resultados das cargas provocadas apenas pelos elementos de betão armado, na base dos pilares (Tabela 10):

Tabela 10 - Cargas provocadas pelos elementos de betão armado

		N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
PA1	SAP2000	-55,055	-0,024	-1,982	-1,420	-0,457	-0,373
	ANSYS	-55,412	-0,487	-1,553	-1,206	-0,162	-0,229

Neste caso a diferença é muito menor, uma vez que as cargas estão aplicadas de igual forma nos dois programas de cálculo automático.

3. Análise Modal

O equilíbrio dinâmico de um sistema com múltiplos graus de liberdade, depende das equações do movimento que podem ser estabelecidos a partir do equilíbrio das forças associadas a cada grau de liberdade. Porém, cada um destes vectores de forças resultantes do movimento depende das variáveis que descrevem o movimento: o deslocamento (Equação 15), a velocidade (Equação 16) e a aceleração (Equação 17) em cada grau de liberdade.

Assim:

(15)

(16)

(17)

Onde,

;

;

;

[K] – Matriz de Rigidez da estrutura;

[C] – Matriz de Amortecimento;

[M] – Matriz de Massa.

Assim, juntando as equações (15), (16) e (17) tem-se a equação de equilíbrio dinâmico (Equação 18),

(18)

Com,

- Forças exteriores.

Os modos de vibração são representações da deformada da estrutura quando esta está a vibrar com uma determinada frequência, logo para cada modo de vibração existe uma frequência própria associada. Estas características são inerentes à estrutura e portanto não dependem do tipo de acções aplicadas na estrutura.

Os modos de vibração da estrutura costumam-se determinar sem o efeito de amortecimento (modos de vibração não amortecidos). Neste caso a Equação 18 pode-se simplificar retirando o termo referente ao amortecimento da estrutura:

(19)

Admitindo que o modo de vibração representa um movimento harmónico de frequência p , a função de deslocamento pode ser exprimida da maneira seguinte (Equação 20),

(20)

Onde,

- Vector da deformada da estrutura, que corresponde a amplitude de vibração de cada nó;

p – Frequência circular de vibração;

Φ – Fase.

Assim derivando duas vezes a equação 20 chega-se à equação 21,

(21)

Substituindo na equação 19:

(22)

(23)

Logo,

(24)

Para que o sistema anterior tenha uma solução não trivial com ω é necessário que se anule o determinante da matriz da equação 24. Assim $1/\omega^2$ correspondem aos valores próprios da matriz $K^{-1} \cdot M$.

Para chegar ao período (T) da estrutura, tem-se apenas de usar a fórmula que transforma a frequência cíclica (f) em período: $T = 1/f$.

É de salientar que irão existir tantos modos de vibração, quantos graus de liberdade a estrutura tiver e consequentemente o mesmo número de frequências próprias. No modelo de elementos finitos este número corresponde ao número de nós não restringidos multiplicado pelo número de graus de liberdade que cada um tem, ou seja 6 (3 translações e 3 rotações) no caso dos elementos que usem a redução dimensional. O número de graus de liberdade define a dimensão de matrizes e assim o número de valores próprios da matriz dinâmica o que corresponde ao número de frequências próprias.

3.1. Apresentação de Resultados - Análise Modal

Nas Tabela 11 e Tabela 33 e na Figura 35 podem-se observar os resultados obtidos nos dois programas.

Tabela 11 - Frequências e Períodos Próprios

Modo	SAP		ANSYS	
	T [s]	f [Hz]	T [s]	f [Hz]
1	0,510	1,959	0,520	1,923
2	0,322	3,102	0,320	3,126
3	0,304	3,284	0,297	3,368
4	0,160	6,237	0,162	6,169
5	0,094	10,645	0,093	10,740
6	0,087	11,453	0,087	11,491
7	0,083	12,108	0,083	12,079
8	0,072	13,902	0,072	13,968
9	0,066	15,251	0,065	15,269
10	0,061	16,311	0,061	16,450
11	0,055	18,264	0,054	18,446
12	0,054	18,525	0,052	19,189
13	0,053	19,032	0,051	19,436
14	0,052	19,194	0,051	19,586
15	0,049	20,344	0,048	20,765
16	0,048	20,746	0,047	21,198
17	0,048	20,887	0,047	21,312
18	0,047	21,118	0,047	21,361
19	0,047	21,225	0,046	21,760
20	0,047	21,451	0,046	21,814

Foi escolhido este número bastante elevado de modos para se poder fazer uma comparação mais aprofundada.

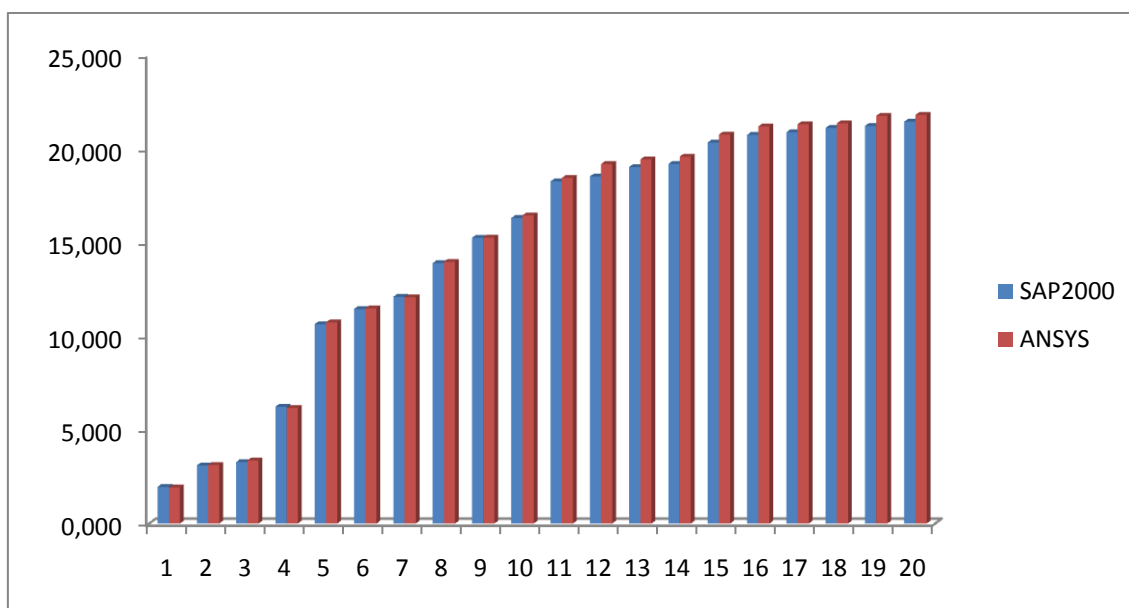


Figura 35 – Gráfico para Comparação de Frequências

3.2. Análise Modal – Resumo

Para a realização da análise modal, os programas de cálculo numérico contam com os dados fornecidos pelo utilizador na fase de modelação, desprezando todo o tipo de cargas atribuídas, e considerando apenas a massa da estrutura. Nesta análise não se utilizou qualquer majoração da massa ou seja o coeficiente de majoração da carga permanente não foi aplicado.

Deixando mais uma vez de parte as diferenças visuais de menu entre estes dois programas, estas ferramentas têm uma forma muito semelhante e fácil de proceder a esta análise, uma vez que ambos os softwares têm esta funcionalidade bem definida.

Na Tabela 11 pode-se observar, que os dois programas deram resultados na mesma ordem de grandeza, sendo que a partir do modo de vibração 10 o SAP2000 apresenta um comportamento mais flexível.

Apesar destas diferenças na flexibilidade da estrutura modelada no programa SAP2000, as deformadas apresentadas na estrutura, são em todos os modos muito semelhantes, como se pode ver no Anexo I, isto acontece mesmo no modo 12 onde, se encontra a maior diferença de frequências. A maior flexibilidade do modelo SAP2000 pode se atribuir às diferenças de malha nas lajes dos pisos. Devido ao facto que as formas deformadas dos primeiros modos afectam principalmente os pilares, onde foi fácil impor a mesma malha nos dois programas (6 elementos por cada altura de piso) os valores das frequências são muito próximas. Nos outros modos de vibração a deformação das lajes é mais salientada e por isso as diferenças de malha implicam diferenças nos valores das frequências.

Ao analisar os vários modos, vê-se que os modos com a deformada principalmente de torção são os modos 1, 3, 4 e 5, e que mais contribui à flexão é o modo 2. Neste modo de vibração observa-se, um movimento ao nível dos pisos provocando uma flexão nos pilares devido ao movimento das lajes (veja Tabela 33).

Nesta análise os resultados foram muito satisfatórios, uma vez que existe uma aproximação muito grande nos resultados das frequências da estrutura.

Mais uma vez a distribuição da malha pela estrutura pode ter influência nas pequenas diferenças vistas nos resultados desta análise, dado que a matriz de massa implementada não foi na sua forma consistente, porque o SAP2000 não disponibiliza esta opção.

4. Análise Sísmica por Espectros de Resposta

A análise sísmica de uma estrutura refere o comportamento dessa estrutura quando solicitada por um movimento na base, provocado por uma acção sísmica.

Nos estudos sísmicos de estruturas, o objectivo é saber os valores extremos da resposta da estrutura à acção sísmica à qual está a ser analisada. As análises destes estudos poderão ser lineares ou não-lineares, estáticas ou dinâmicas. Um possível estudo simplificado que pertence ao tipo de análises estáticas lineares é a análise sísmica utilizando as forças laterais equivalentes.

Para se poder considerar que um edifício tem um comportamento em que a sua resposta calculada pelo este método simplificado terá uma aproximação razoável à resposta real, este tem que obedecer a uma série de condições relativas à sua regularidade [RSA]:

- Não apresentar, em planta, distribuições desproporcionais entre massa e a rigidez;
- Não apresentar, no seu desenvolvimento em altura, grandes variações de massa ou rigidez;
- Ter uma estrutura em malha ortogonal e não demasiado disforme;
- Ter os pisos constituídos de forma a que possam considerar-se como diafragmas indeformáveis no seu plano;

Neste aspecto o edifício em estudo cumpre todos os requisitos necessários. No entanto não se procedeu a este tipo de análise, e utilizou-se um método mais detalhado, que é a análise sísmica por espectros de resposta.

Os espectros de resposta são representações gráficas do valor máximo da resposta de um conjunto de osciladores de um grau de liberdade, quando solicitados por uma acção sísmica idêntica na sua base.

Quando se está na presença de um oscilador de 1 grau de liberdade, podem ter-se três tipos de espectros de resposta: os medidos em função do deslocamento (Equação 25), os medidos em função da velocidade (Equação 26) ou os medidos em função da aceleração (Equação 27), os três medidos em termos da resposta máxima transiente ou em termos de amplitude da resposta estacionária.

Porém, todos estes tipos de espectros são representados em função das frequências próprias, que se costumam se diferenciar pelo do factor de amortecimento.

Aplicando o conceito de espectros de resposta ao comportamento de uma estrutura de vários graus de liberdade, podem obter-se os valores máximos dos deslocamentos, velocidades ou acelerações combinando as respostas máximas que correspondem a cada modo de vibração que ela apresenta. Assumindo que a estrutura vibra somente de acordo com um modo de vibração particular, os valores máximos da sua resposta estacionária numa das direcções, por exemplo x , poderão ser obtidos através das fórmulas:

(25)

(26)

(27)

- Deformada do modo de vibração n ;
- Factor de participação do modo n ;
- Valor do espectro de resposta de deslocamentos para a direcção x ;
- Valor do espectro de resposta de velocidade para a direcção x ;
- Valor do espectro de resposta de aceleração para a direcção x .

P - frequência natural correspondente ao modo n

Depois de ter as deformadas máximas correspondentes a cada modo de vibração, é preciso calcular a resposta que será alvo de verificação, como por exemplo um deslocamento ou algum esforço interno num ponto particular. Depois de obter a resposta pretendida em cada modo de vibração, é necessário obter um valor credível deste valor que corresponde à resposta global da estrutura, visto que este não poderá ser uma simples soma dos valores obtidos em cada modo de vibração.

Tem-se então de combinar os valores obtidos. Para esta tarefa pode-se contar com alguns métodos de combinação modal. [Guerreiro, 1999]

- Square Root of Sum of Squares (SRSS) – Raiz quadrada da soma dos quadrados;
- Complete Quadratic Combination (CQC) – Combinação Quadrática Completa;
- Double Sum (DSUM) – Soma Dupla;

- Grouping (GRP) – Agrupamento/ Ordem;
- Naval Research Laboratory Sum (NRLSUM) – Soma do Laboratório de Pesquisa Naval.

Todas estas opções podem ser encontradas no ANSYS, no entanto o SAP2000 disponibiliza apenas:

- Square Root of Sum of Squares (SRSS) – Raiz quadrada da soma dos quadrados;
- Complete Quadratic Combination (CQC) – Combinação Quadrática Completa;
- Double Sum (DSUM) – Soma Dupla;

Neste trabalho vai falar-se apenas nas duas mais usadas.

A combinação mais utilizada para este fim é a Raiz Quadrada da Soma dos Quadrados (SRSS), que calcula a resposta total para uma dada direcção através da fórmula (28):

$$R_i^{\max} = \sqrt{\sum_{j=1}^n r_{i,j}^{\max 2}} \quad (28)$$

onde R_i^{\max} é a resposta global máxima no lugar i , e $r_{i,j}^{\max}$ é a resposta máxima no lugar i que corresponde ao modo j , e n é o número dos modos considerados.

O SRSS só tem resultados fiáveis quando as frequências dos vários modos de vibração estão suficientemente afastadas, isto porque se considera que cada modo de vibração é independente do outro, o que quando as frequências são muito próximas não é verdade. Também em situações tridimensionais ou com simetria de eixos este método se torna falível.

Para diminuir a falha apresentada pelo método SRSS, pode-se utilizar o método das Combinações Quadráticas Completas (CQC) (Equação 29):

$$R_i^{\max} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{jk} r_{i,j}^{\max} r_{i,k}^{\max}} \quad (29)$$

Em que o coeficiente de correlação se calcula da formula (30):

$$\rho_{jk} = \frac{8\xi^2 \beta_{jk} \beta_{jk}^{3/2}}{(-\beta_{jk}^2)^2 + 4\xi^2 \beta_{jk} (1 + \beta_{jk}^2)}, \quad (30)$$

$\beta_{jk} = \frac{p_j}{p_k}$ é a razão entre as frequências naturais i e j

Verifica-se que $\rho_{kj} = \rho_{jk}$

E ξ - Sendo o coeficiente de amortecimento.

Assim pode observar-se que este método relaciona os valores entre os vários modos de vibração através do coeficiente de correlação (Figura 36), combinando as respostas das vibrações com valores muito próximos entre eles.

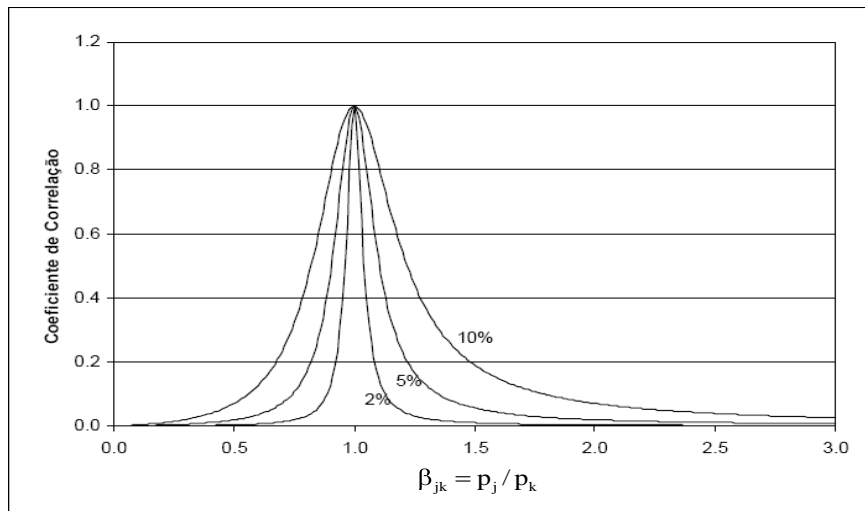


Figura 36 – Variação do coeficiente de correlação (CQC)

Porém este método nem sempre dá os resultados mais extremos como é esperado para a análise de sismos por espectros de resposta, isto pode acontecer quando a resposta pretendida tem sinais contrários em modos que estão em combinação, o que torna o termo cruzado negativo, dado que o coeficiente de correlação é sempre positivo.

Neste trabalho para a realização da análise sísmica por espectros de resposta, vai ser utilizado o método das Combinações Quadráticas Completas, uma vez que é o método mais completo no que diz respeito à correlação entre resultados, porém ambos os programas permitem a utilização de mais métodos.

Salienta-se que a resposta ao sismo não foi combinada com a análise estática da combinação fundamental, e por isso os valores apresentados não servem para a verificação da estrutura, mas apenas para a comparação de dois programas de cálculo, que é o objectivo deste trabalho. Pela

mesma razão implementou-se apenas a massa corresponde à estrutura, ou seja os modos de vibração utilizados como a base destas análises são os mesmo, como já apresentados. Devido à base de edifício ser quase quadrada, o sismo foi aplicado apenas numa das direcções, nomeadamente x.

Para a realização deste trabalho, optou-se por fazer um estudo seguindo as normas utilizadas pelo projectista na realização do projecto original, por este motivo foram utilizados os sismos (Tabela 12) previstos no Regulamento de Segurança e Acções (RSA), bem como as designações do terreno que no presente caso é o de tipo II.

Tabela 12 - Definição dos Sismos

Acção tipo 1 - Terreno tipo II		Acção tipo 2 - Terreno tipo II	
T [s]	Aceleração [m/s ²] $\xi=5\%$	T [s]	Aceleração [m/s ²] $\xi=5\%$
0,04	1,791	0,04	1,185
0,045	2,056	0,045	1,275
0,05	2,609	0,05	1,471
0,055	3,146	0,055	1,729
0,06	3,404	0,06	1,944
0,07	3,683	0,07	2,182
0,08	3,948	0,08	2,267
0,09	4,091	0,09	2,291
0,1	4,138	0,1	2,287
0,12	4,101	0,12	2,27
0,14	4,075	0,14	2,339
0,16	4,146	0,16	2,391
0,18	4,165	0,18	2,397
0,2	4,124	0,2	2,377
0,25	3,9	0,25	2,346
0,3	3,589	0,3	2,417
0,4	3,002	0,4	2,394
0,5	2,59	0,5	2,351
0,8	1,746	0,6	2,416
1	1,426	0,7	2,419
2	0,635	0,8	2,363
3	0,377	1	2,156
4	0,255	2	1,06
5	0,186	3	0,655
10	0,115	4	0,459
		5	0,345
		10	0,103

Salienta se que para os efeitos de cálculo bastava introduzir nos dois softwares apenas os valores do espectro de resposta em períodos da estruturas, porque os valores intermédios não serão utilizados pelo programa.

4.1. SAP2000 - Análise Sísmica por Espectros de Resposta

Relativamente ao SAP2000, podem ver-se na Tabela 14 os resultados do deslocamento máximo provocados pelo Sismo 1 na direcção X e na Figura 37 a sua deformada.

Tabela 13 - Deslocamentos Máximos por espectros de resposta em SAP2000 (Sismo 1)

Sismo 1

	U_x [m]	U_y [m]	U_z [m]
Deslocamento Máximo	0,0247	0,0180	0,00155
Nó	3078	3115	1068

Sismo 1

Nó	X [m]	Y [m]	Z [m]
3078	8,77	0,00	15,60
3115	0,00	9,14	15,60
1068	17,55	15,30	7,80

Tabela 14 – Posição dos nós onde se verifica o deslocamento máximo no sismo 1

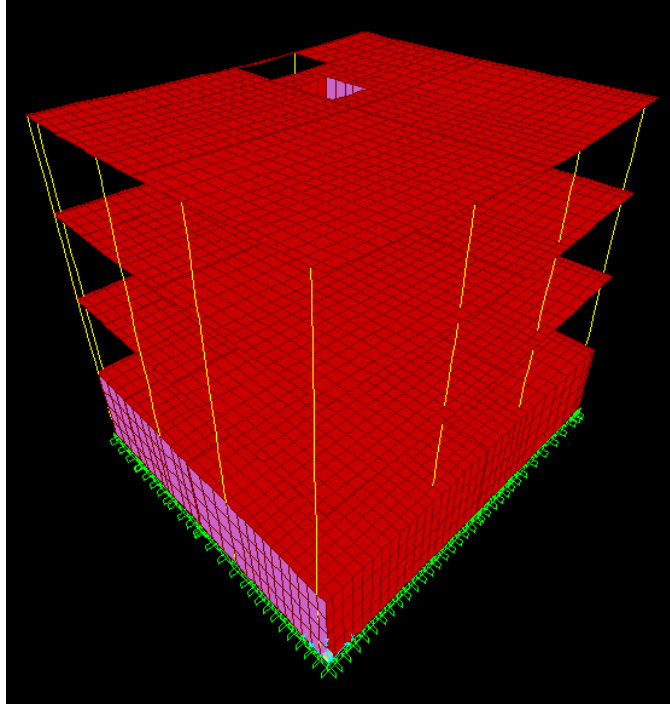


Figura 37 – Deformada em SAP2000 provocada pela Simulação do Sismo tipo 1 na direcção x

Nesta análise foram também retirados os esforços solicitados na base do pilar PA2, para desta forma se ter maior recessão do comportamento da estrutura (Tabela 15).

Tabela 15 - Apresentação dos esforços para o Sismo tipo 1 - SAP2000

SAP2000	PA2	Cota	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
		0,0	20,705	0,057	5,373	6,498	1,514	2,054

Na Tabela 17 vêem-se os resultados retirados do SAP2000 para o sismo do tipo 2, e a sua deformada na Figura 38, bem como os esforços solicitados nos pilar em estudo (Tabela 18).

Tabela 16 - Deslocamentos Máximos por espectros de resposta em SAP2000 (Sismo 2)

Sismo 2

	U_x [m]	U_y [m]	U_z [m]
Deslocamento Máximo	0,0207	0,0146	0,0013
Nó	3078	3115	1068

Sismo 2

Nó	X [m]	Y [m]	Z [m]
3078	8,77	0,00	15,60
3115	0,00	9,14	15,60
1068	17,55	15,30	7,80

Tabela 17 - Posição dos nós onde se verifica o deslocamento máximo no sismo 2

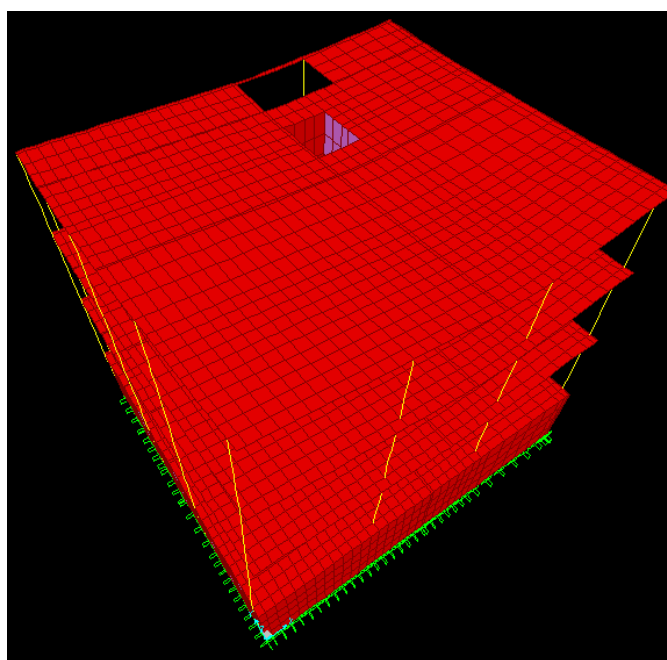


Figura 38 - Deformada em SAP2000 provocada pela Simulação do Sismo tipo 2 na direcção x

SAP2000	PA2	Cota	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
		0,0	15,487	0,045	4,330	5,260	1,193	1,503

Tabela 18 - Apresentação dos esforços para o Sismo tipo 2 - SAP2000

4.2. ANSYS - Análise Sísmica por Espectros de Resposta

Relativamente ao ANSYS, pode-se ver os resultados dos deslocamentos para o sismo 1 na Tabela 20 e a deformada através da Figura 39, bem como os esforços solicitados nos pilar em estudo (Tabela 21).

Tabela 19 - Deslocamentos Máximos por espectros de resposta em ANSYS (Sismo 1)

Sismo 1

	U _x [m]	U _y [m]	U _z [m]
Deslocamento Máximo	0,0218	0,0160	0,0014
Nó	3796	4405	2229

Sismo 1

Nó	X [m]	Y [m]	Z [m]
3796	8,78	0,00	15,60
4405	0,00	9,14	15,60
2229	17,55	15,30	7,80

Tabela 20 – Posição dos Deslocamentos Máximos Sismo 1

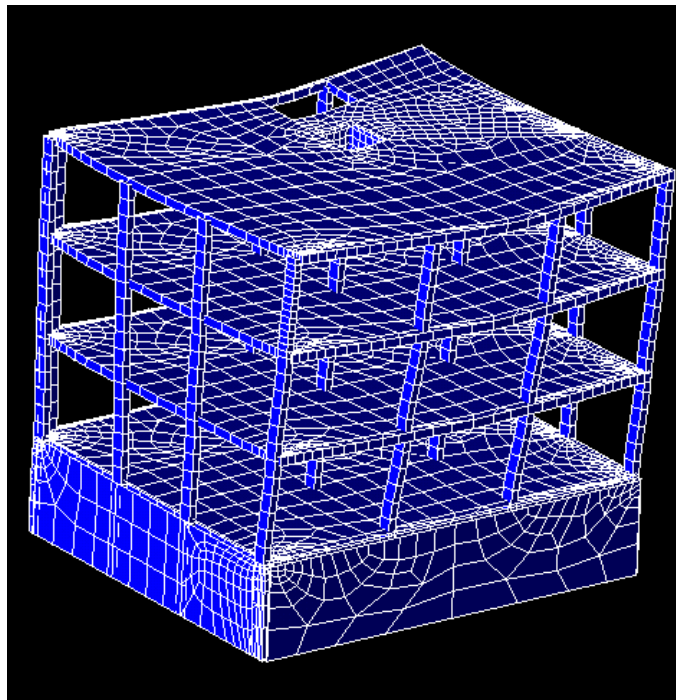


Figura 39 - Deformada em ANSYS provocada pela Simulação do Sismo tipo 1 na direcção x

ANSYS	PA2	Cota	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
		0,0	18,145	0,0379	6,189	8,294	2,074	2,741

Tabela 21 - Apresentação dos esforços para o Sismo tipo 1 - ANSYS

Na Tabela 23 vêem-se os resultados do deslocamento retirados do ANSYS para o sismo do tipo 2, e a sua deformada na Figura 40, bem como os esforços solicitados nos pilar em estudo na Tabela 24.

Tabela 22 - Deslocamentos Máximos por espectros de resposta em ANSYS (Sismo 2)

Sismo 2

	U_x [m]	U_y [m]	U_z [m]
Deslocamento Máximo	0,0214	0,0147	0,0013
Nó	3796	4405	2229

Sismo 2

Nó	X [m]	Y [m]	Z [m]
3796	8,78	0,00	15,60
4405	0,00	9,14	15,60
2229	17,55	15,30	7,80

Tabela 23 – Posição dos Deslocamentos Máximos Sismo 2

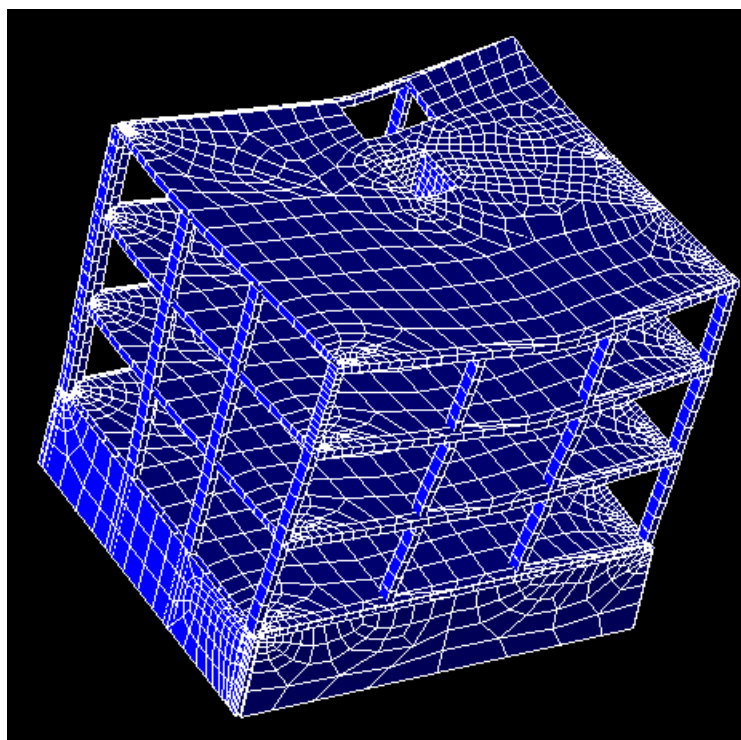


Figura 40 - Deformada em ANSYS provocada pela Simulação do Sismo tipo 2 na direcção x

ANSYS	PA2	Cota	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
		0,0	14,989	0,025	5,720	7,537	1,900	2,303

Tabela 24 - Apresentação dos esforços para o Sismo tipo 2 - ANSYS

4.3. Análise Sísmica por Espectros de Resposta - Resumo

Como se pode observar na fundamentação teórica feita para esta análise, o que se pretende ao realizar a Análise Sísmica por espectros de resposta são os valores máximos do deslocamento ou de qualquer outra resposta importante para a avaliação da estrutura quando o sismo em estudo decorre. Este sismo foi definido através dos espectros elásticos presentes no RSA.

Na Tabela 25 e na Tabela 26 pode comparar-se de uma forma mais expedita os resultados fornecidos nesta análise relativamente aos esforços solicitados no pilar que serve de referência.

	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
SAP2000	20,705	0,057	5,373	6,498	1,514	2,054
ANSYS	18,145	0,0379	6,189	8,294	2,074	2,741

Tabela 25 - Comparação de resultados relativos ao Sismo 1

	N [kN]	T [kN.m]	V3 [kN]	M2 [kN.m]	V2 [kN]	M3 [kN.m]
SAP2000	15,487	0,045	4,330	5,260	1,193	1,503
ANSYS	14,989	0,025	5,720	7,537	1,900	2,303

Tabela 26 - Comparação de resultados relativos ao Sismo 2

Como se vê, os resultados dos esforços para os pilares são muito semelhantes, estando todos eles na mesma ordem de grandeza, isto acontece para os dois sismos. Porém, existem algumas diferenças relevantes no pilar, principalmente no sismo 1, onde se pode observar a maior diferença. É de lembrar que esta análise apoia-se na análise modal, e como já se viu anteriormente, os resultados desta, entre os dois programas, também tinham alguma discrepância, o que faz com que estes resultados também tenham as suas diferenças.

O facto observado na análise modal, de que a estrutura se comporta de uma forma mais flexível no SAP2000 a partir do modo de vibração 10, tem também aqui a sua influência.

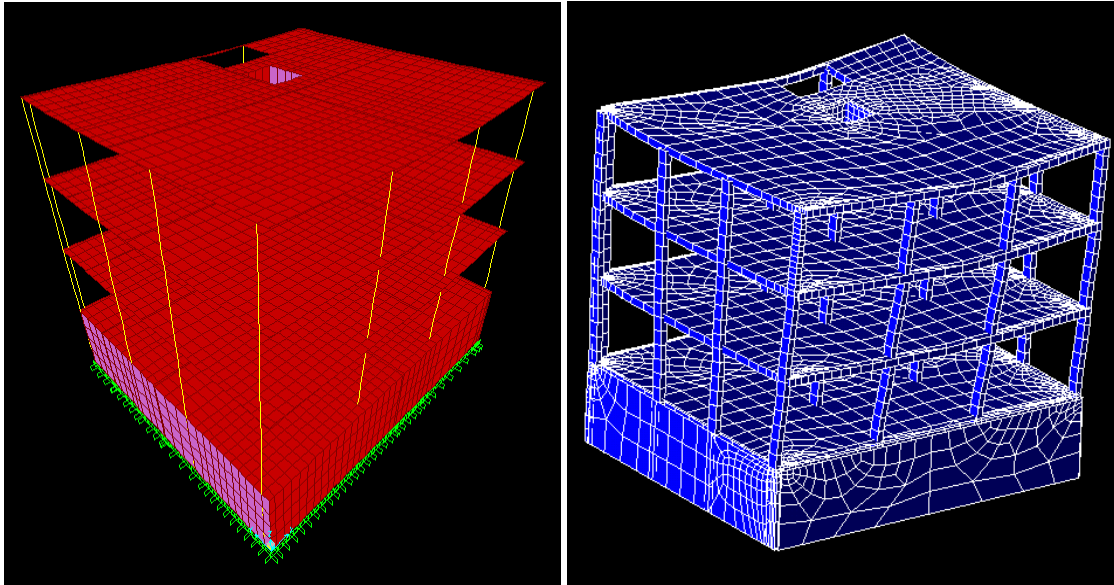


Figura 41 - Deformadas do Sismo 1 – Comparação

As deformadas apresentadas para o sismo 1 são muito semelhantes entre os dois programas, existindo porém algumas diferenças muito baixas nos deslocamentos máximos da estrutura no que diz respeito à direcção x, como se pode observar na Tabela 27.

Tabela 27- Deslocamentos do Sismo 1 - Comparação

Sismo 1	Ux [m]	Uy [m]	Uz [m]	
Deslocamento Máximo	0,0247	0,0180	0,0015	SAP2000
Deslocamento Máximo	0,0218	0.0160	0,0014	ANSYS

No que diz respeito ao sismo do tipo 2 tem-se as deformadas a partir da Figura 42.

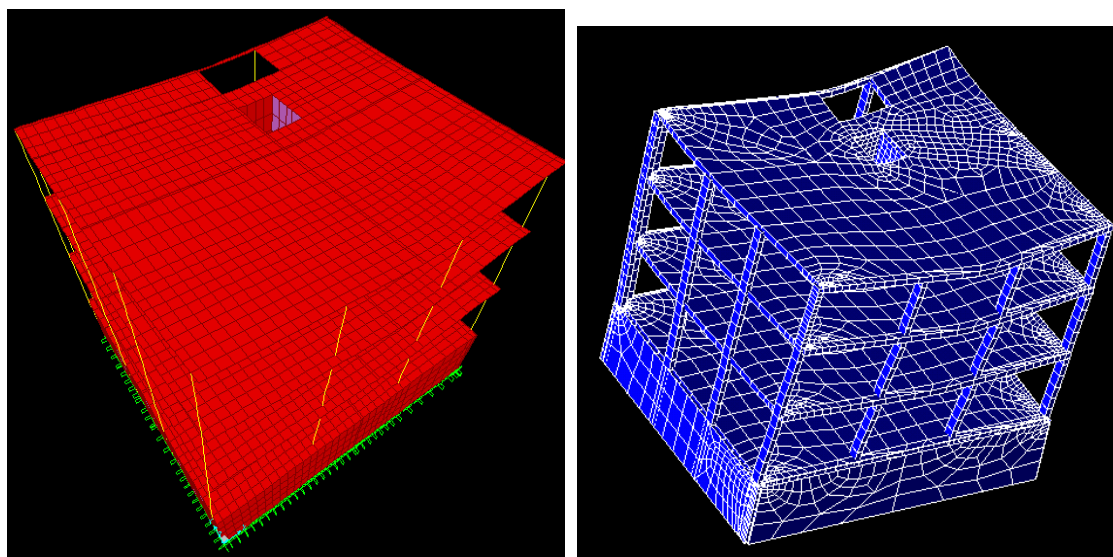


Figura 42 - Deformadas do Sismo 2 – Comparação

Como se pode observar, as deformadas, tal como para o sismo 1, são praticamente idênticas, como era de se esperar. Porém, neste caso os valores dos deslocamentos entre os dois programas são ligeiramente diferentes como se observa na Tabela 28.

Tabela 28 - Deslocamentos do Sismo 2 - Comparação

Sismo 2	Ux [m]	Uy [m]	Uz [m]	
Deslocamento Máximo	0,0207	0,0146	0,0013	SAP2000
Deslocamento Máximo	0,0214	0,0147	0,0013	ANSYS

Neste caso, pode observar-se que os valores no deslocamento em x tem uma ligeira diferença nos resultados dos dois programas, porém não se torna significativa esta diferença.

Relativamente à modelação, no SAP2000 é necessário definir o sismo que irá ser utilizado para a análise, através da introdução dos valores de aceleração e período do sismo referido pelo RSA, sem restrições de número de valores. Após esta introdução tem que introduzir-se o tipo de análise e referir qual o método que se pretende utilizar para a combinação dos valores obtidos, que no caso

do presente trabalho foi a Combinação do Quadrática Completa (CQC). A partir deste momento pode-se fazer o programa correr e retirar os valores que sejam importantes para análise.

Porém, a diferença mais marcante está no modo de colocação dos dados do sismo no programa, para o ANSYS devem-se colocar as frequências por ordem crescente com um máximo de 20 valores.

As diferenças apresentadas nos resultados dos modelos para a análise sísmica por espectros de resposta podem ter várias influências que expliquem este facto. É de notar que todos os erros referidos anteriormente têm um factor acumulativo uma vez que influenciaram a análise modal uma primeira vez e vão influenciar uma segunda vez na análise sísmica por espectros de resposta.

Apesar das diferenças apresentadas ao longo desta análise, é de salientar que os nós onde se encontram os deslocamentos máximos são os mesmos nos dois programas.

Para a realização desta análise estudou-se também o factor de participação modal. Retirou-se este dado de uma forma automática nos dois programas, estando o resultado na Tabela 29.

Tabela 29 - Factor de participação

Modo	SAP	ANSYS
1	19,337	19,398
2	-12,926	6,234
3	15,162	19,041
4	6,793	6,860
5	3,458	-3,678
6	-7,895	4,508
7	-6,146	9,350
8	-0,120	0,386
9	-0,238	-0,539
10	0,137	-0,119
11	-0,166	0,276
12	0,184	-0,063
13	0,178	0,373
14	-0,450	-0,643
15	0,777	-0,712
16	-0,545	1,203
17	-3,671	-1,799
18	3,756	0,362
19	-1,066	3,384
20	0,475	3,864

É através deste factor que se chega ao modo que mais contribui para a análise sísmica, que no caso em estudo é o modo 1 nos dois programas com valores muito próximos. Note-se que as diferenças no sinal não são importantes, visto que nestes casos a deformada modal da estrutura foi virada aos lados contrários nos 2 programas. A contribuição dos modos de torção é praticamente igual nos dois programas (modos 1, 3, 4, 5), no entanto o modo de flexão, modo 2, mostra uma diferença significativa. É de notar que os modos mais elevados têm o factor de contribuição ainda significativo, por isso não foi desnecessário utilizar em análise os 20 primeiros modos.

No que diz respeito ao sismo 1, este devido à pequena diferença entre os períodos apresentados na análise modal, tem um valor de espectro ligeiramente diferente, como se pode ver a tabela:

Tabela 30 - Factor de participação Sismo 1

	T [s]	A [m/s ²]
ANSYS	0,52	2,824
SAP2000	0,51	2,716

Também pelos mesmos motivos os valores da aceleração para o sismo 2 têm uma ligeira diferença, como se observa na Tabela 31.

Tabela 31 - Factor de participação Sismo 2

	T [s]	A [m/s ²]
ANSYS	0,52	1,574
SAP2000	0,51	1,523

Ao analisar o modo em que o factor de participação é maior, chega-se a conclusão que este é muito semelhante nos dois programas, não só como já se viu, na deformada, mas também no deslocamento máximo apresentado (Tabela 32).

Tabela 32 - Deslocamento máximo do modo com maior factor de participação

	U _{max} [m]
ANSYS	0,0026
SAP2000	0,0023

Pode-se então concluir que no caso em estudo, ambos os programas têm uma aproximação no que diz respeito à análise sísmica, uma vez que, em todos os aspectos, os seus resultados são muito semelhantes.

Considerações Finais

Depois do estudo feito neste trabalho existem várias conclusões que devem ser referidas nestas considerações finais.

Existem no mercado diversos programas de cálculo numérico que usam como base do seu funcionamento o método dos elementos finitos, apesar disto cada um deles tem as suas particularidades que os tornam diferentes entre eles e portanto mais indicado de situação para situação.

Nesta dissertação foram escolhidos os programas SAP2000 e ANSYS para fazer a comparação entre eles, na óptica de um utilizador comum.

O autor deste trabalho partiu para a realização do mesmo com poucos conhecimentos no que dizia respeito ao trabalho nestes programas, chegando a este ponto com conhecimentos suficientes para se movimentar e realizar as tarefas que lhe sejam exigidas como projectista, portanto no que diz respeito ao primeiro objectivo deste trabalho foi cumprido.

A primeira diferença que o utilizador pode observar, acontece logo ao iniciar o programa uma vez que o ambiente de trabalho bem como os menus que cada um apresenta são totalmente diferentes.

O SAP2000 é um programa mais intuitivo onde o utilizador tem mais facilidade em compreender como vai manobrar o programa, bem como maior facilidade em desenhar e mover-se dentro do modelo, o que vai facilitar o trabalho do projectista e consequentemente minimizar os possíveis erros de modelação. No ANSYS o ambiente de trabalho é menos intuitivo, apesar de organizado é necessário conhecer bem as funcionalidades e perder algum tempo para se adaptar.

Outro factor importante é o público-alvo para que estas ferramentas foram feitas, uma vez que esse elemento determina as funcionalidades que cada programa tem consoante o utilizador vai precisar. Neste caso o SAP2000 está mais virado para a engenharia civil e o ANSYS é mais generalista, sendo que a engenharia mecânica é o público mais atractivo deste programa.

Por este motivo, o SAP2000 torna-se assim um programa mais limitado no que diz respeito à utilização de estudos para além das estruturas e análises mais utilizadas para estruturas de engenharia civil, pode-se ver este facto por exemplo na integração dos regulamentos desta área no programa, facilitando o projectista que apenas tem que escolher qual o que vai utilizar para cada projecto, também na aplicação de factores de majoração que é facilitada pela programação do programa que desde logo está adaptada ao modo de trabalho da engenharia civil.

Já no ANSYS, todos estes elementos são menos intuitivos e têm de ser programados para o projecto em questão, isto acontece devido à grande abrangência do mesmo não estando ligado directamente a nenhuma área de estudo. Por este motivo, este programa é mais minucioso podendo ser feitas inúmeras análises diferentes e para inúmeras matérias diferentes.

Uma das grandes diferenças entre estes dois programas é o menu existente no SAP2000 “mass Source”, que vai permitir a introdução dos valores de coeficiente Ψ referentes a cada carga para desta forma se chegar automaticamente aos valores reduzidos que se pretende para cumprir o disposto do regulamento em uso.

Como se viu, o ANSYS é um programa mais generalista que engloba um maior número de matérias e por isso recorre a um número muito variado de funcionalidades que o SAP2000 não tem, talvez por este motivo também o seu menu é menos intuitivo e as suas funcionalidades menos fáceis de realizar.

A nível de resultados e uma vez que ambos os softwares usam o mesmo método para realizar as análises, estes são muito semelhantes, podendo ser afectados por vários factores, como foram descritos ao longo deste trabalho.

Um desses factores é a malha que irá cobrir o modelo e através da qual será analisada a estrutura, esta malha deve ser muito bem escolhida, em termos do tipo e do tamanho de elementos, pois estas escolhas levarão a um conjunto de condições que irão culminar na precisão da análise. Devido ao facto de se detectarem algumas diferenças nos resultados atribuídas às diferenças da malha das lajes dos pisos, é possível concluir, que a malha nos pisos não foi suficientemente refinada.

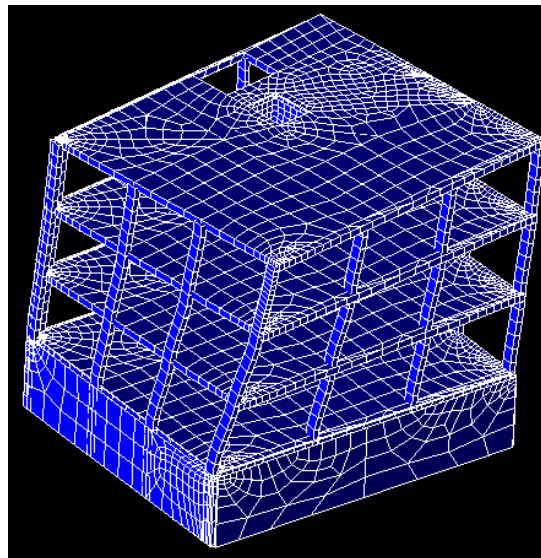
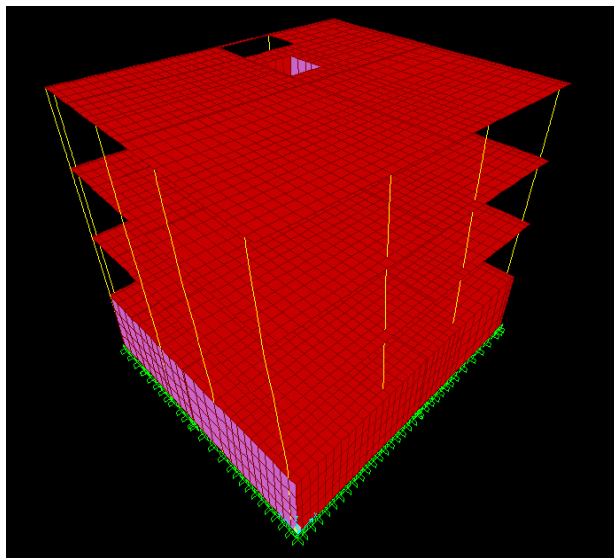
Bibliografia

- Reddy, J. N. (1993). An Introduction to the Finite Element Method. McGraw-Hill, Inc. (1)
- Zienkiewicz, O. C. (2005). The Finite Element Method its Basis & Fundamentals. Butterworth-Heinemann. (2)
- Cook, Robert D. (1995). Finite Element Modeling For Stress Analysis. John Wiley & sons, inc. (3)
- Bhatti, M. Asghar (2006). Advanced topics in Finite Element Analysis of Structures. New York. John Wiley & sons, Inc. (4)
- Azevedo, Álvaro F. M. (2003). Método dos Elementos Finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (5)
- Guerreiro, Luís (1999). Revisões de Análise Modal e Análise Sísmica por Espectros de Resposta. Instituto Superior Técnico. (6)
- Cismasiu, Corneliu (2007). Método dos Elementos Finitos (apontamento para aulas de MEF). Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL. (7)
- Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e Pontes. Porto. Porto editora. (2006) (8)
- Caderno de Encargos do edifício. (1996) (9)
- Manual de Formação Nível básico SAP2000, CSI. (2009) (10)
- Dimitrovová, Zuzana (2009). Folhas de apoio à cadeira de Mecânica dos Meios Contínuos. Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL. (11)

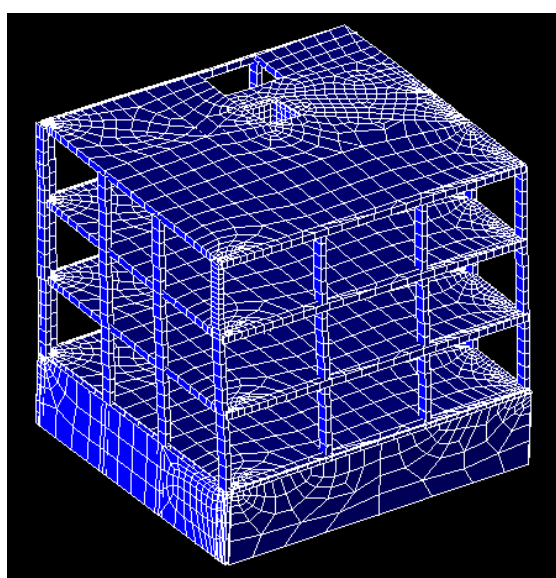
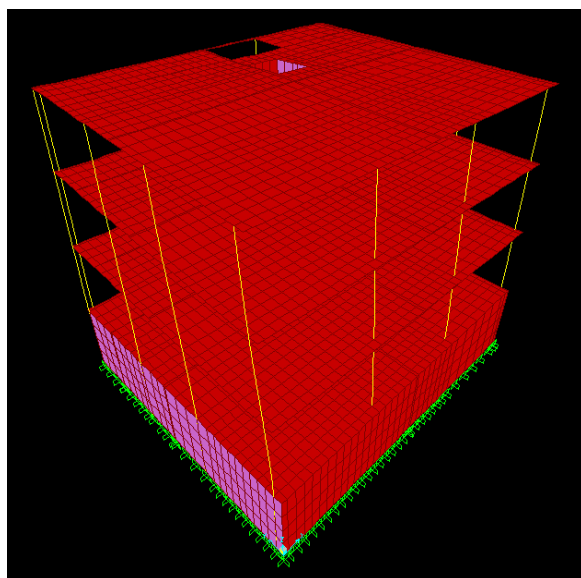
ANEXO I

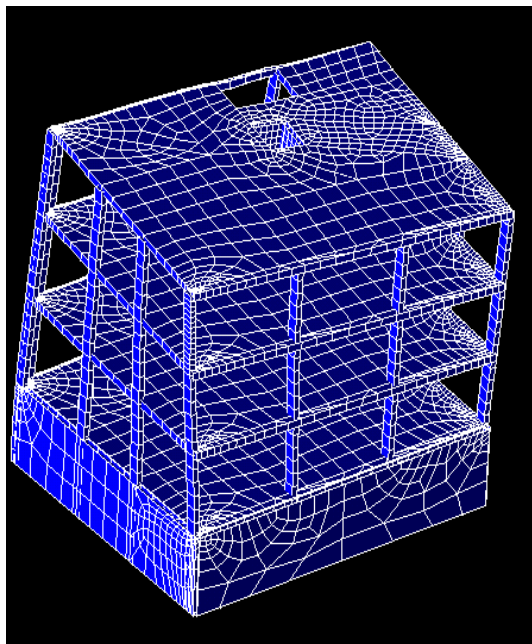
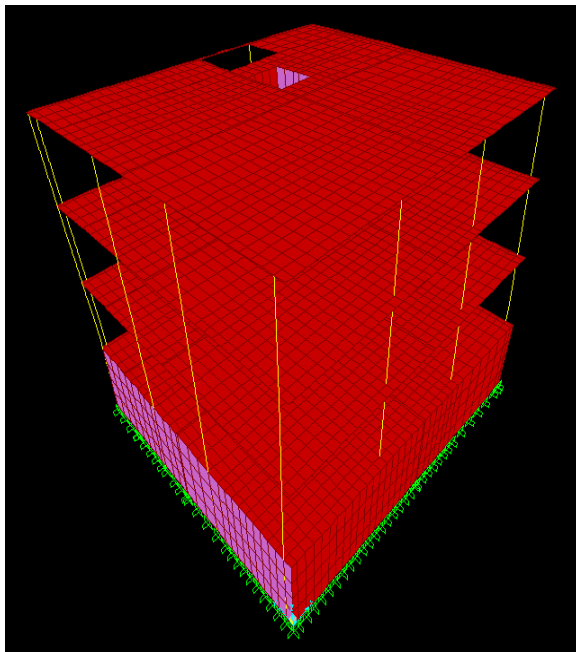
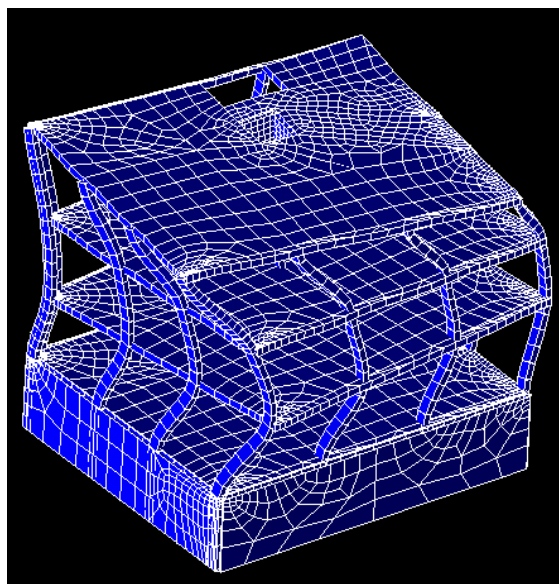
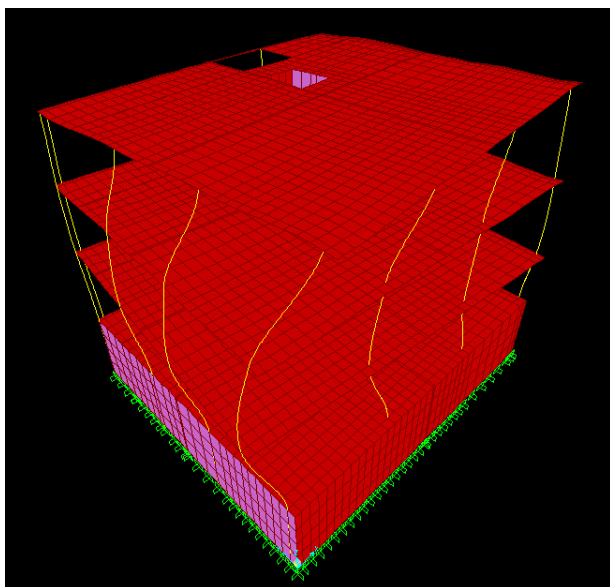
Neste anexo mostram-se as deformadas dos vinte modos de vibração fornecidas pelos dois programas, onde se pode confirmar que para além das frequências anteriormente apresentadas, também estas são muito parecidas.

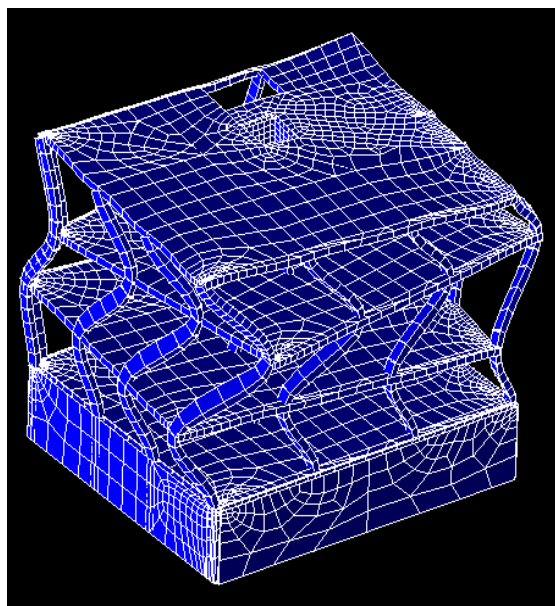
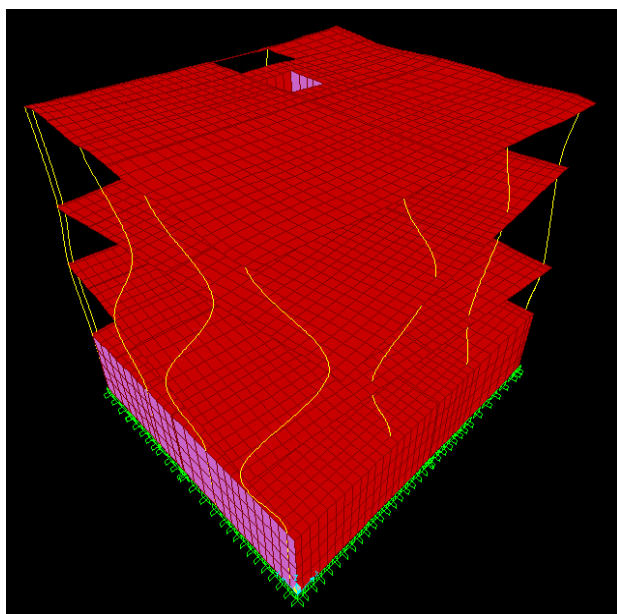
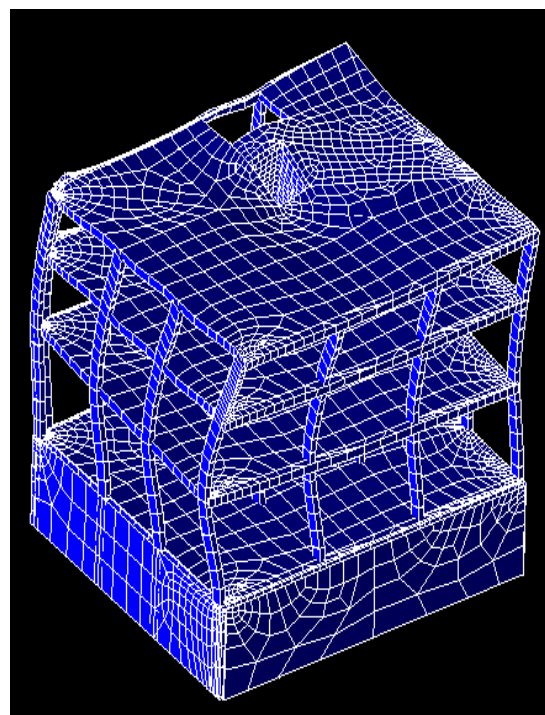
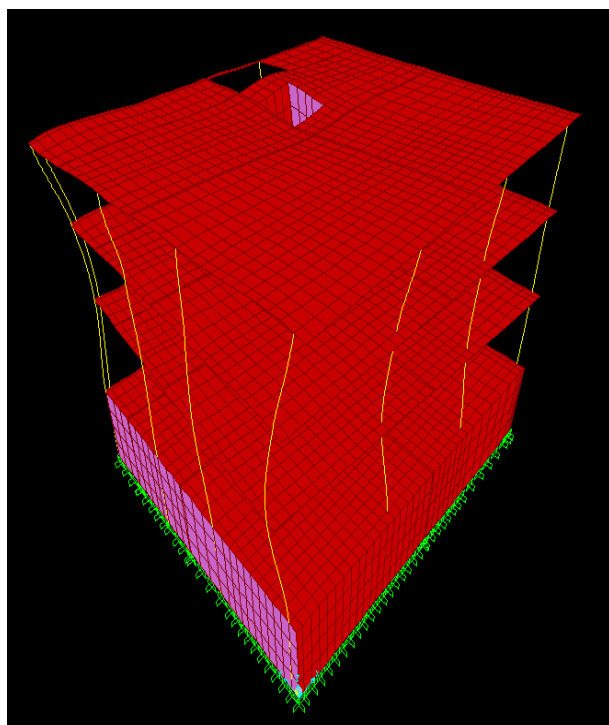
Modo 1

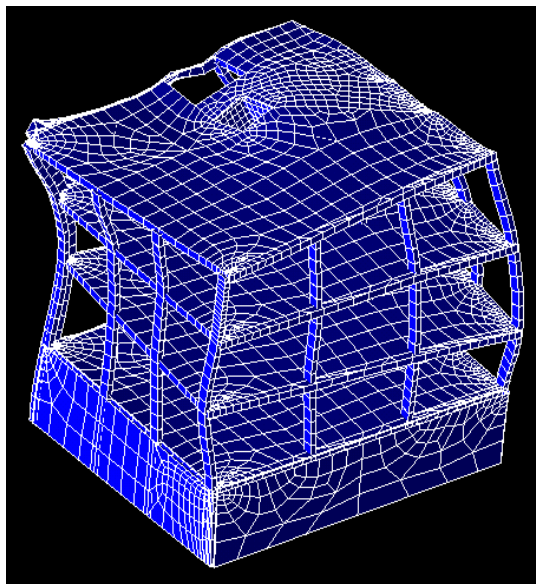
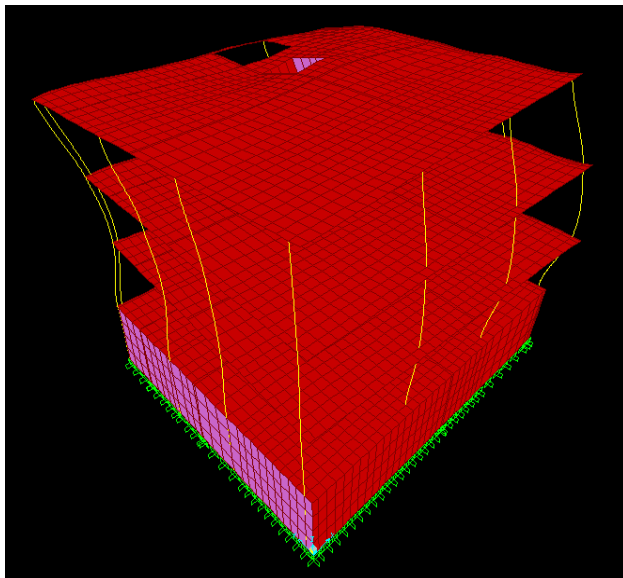
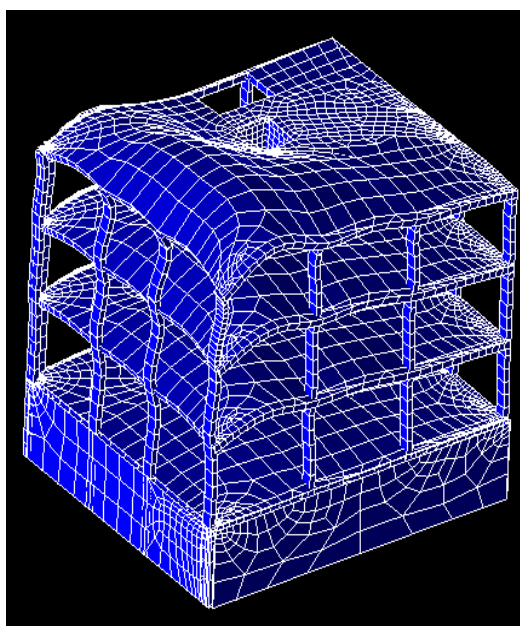
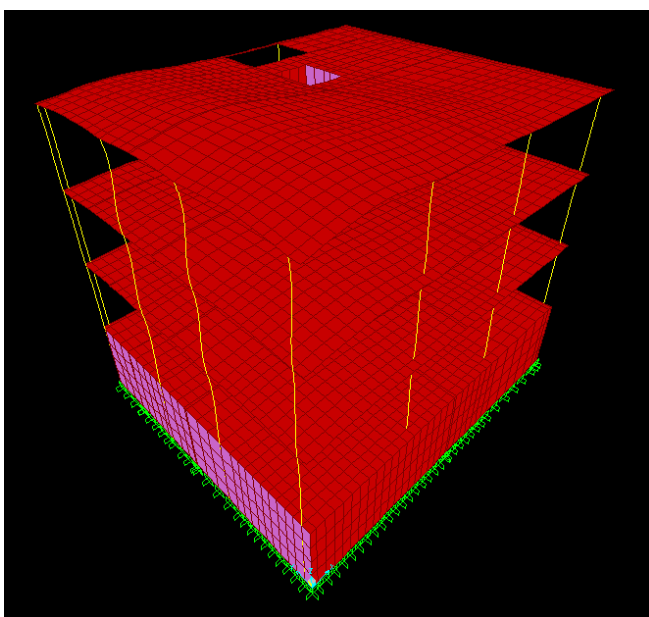


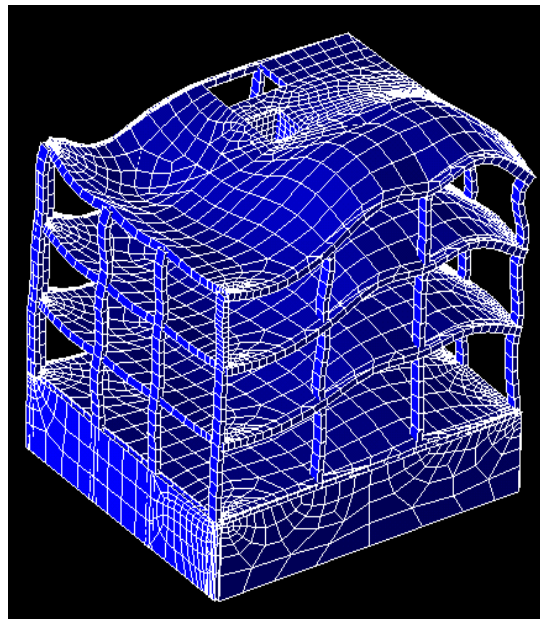
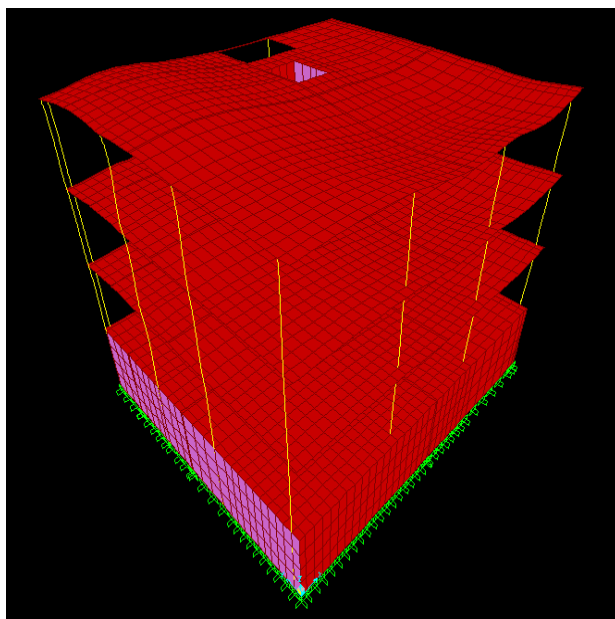
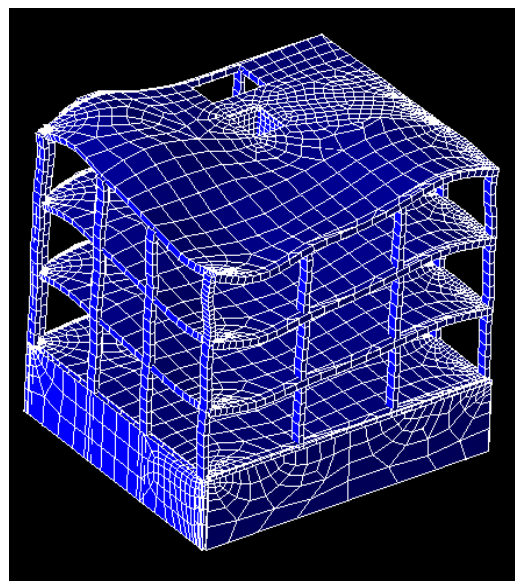
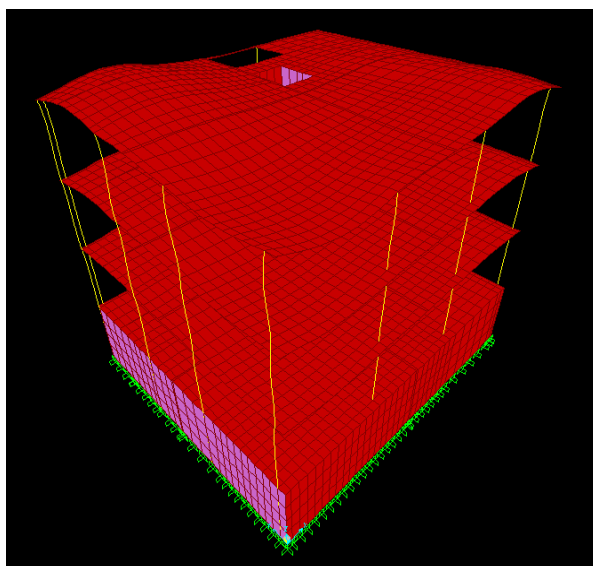
Modo 2

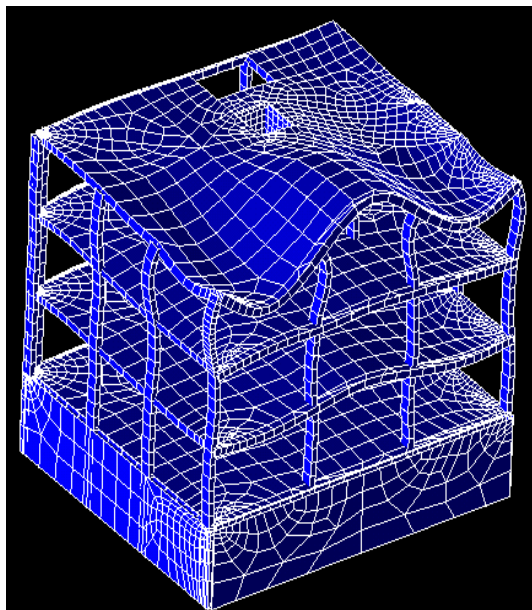
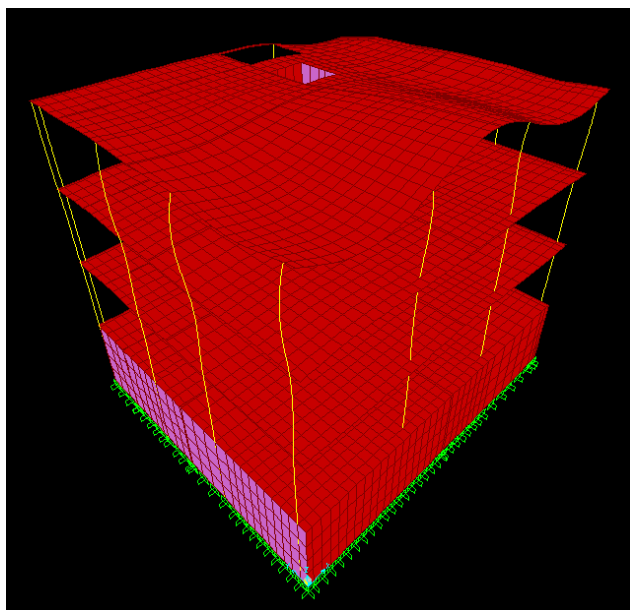
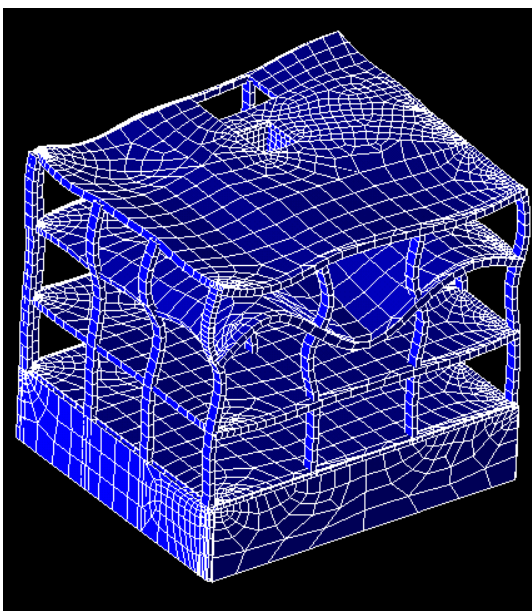
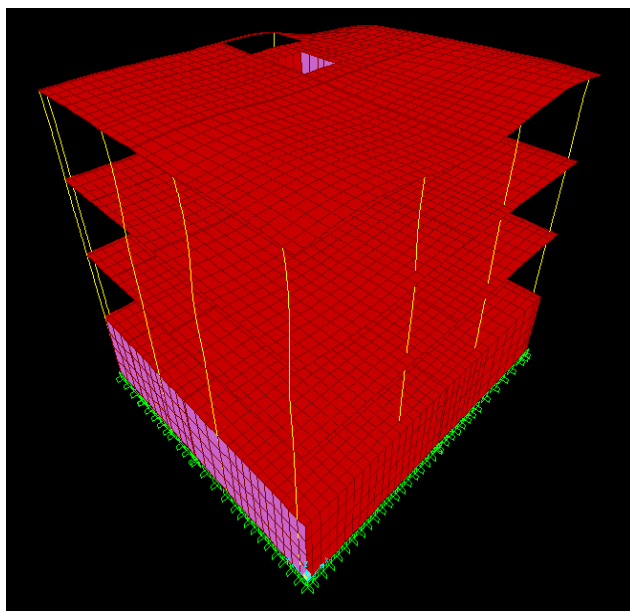


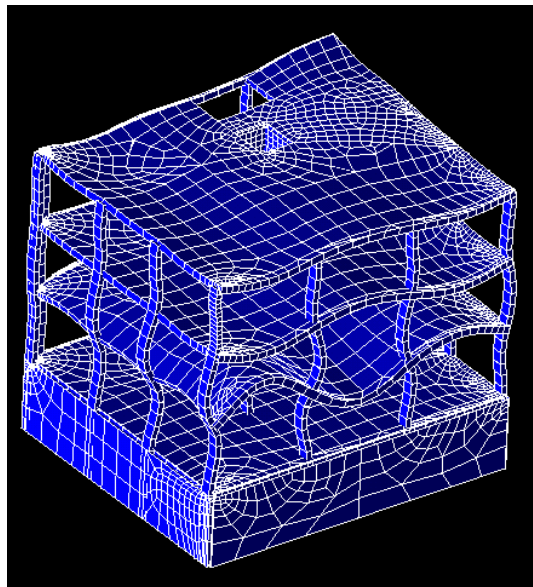
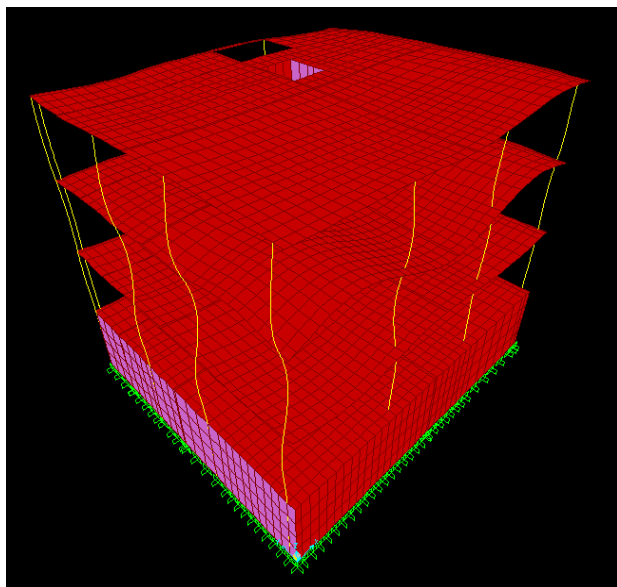
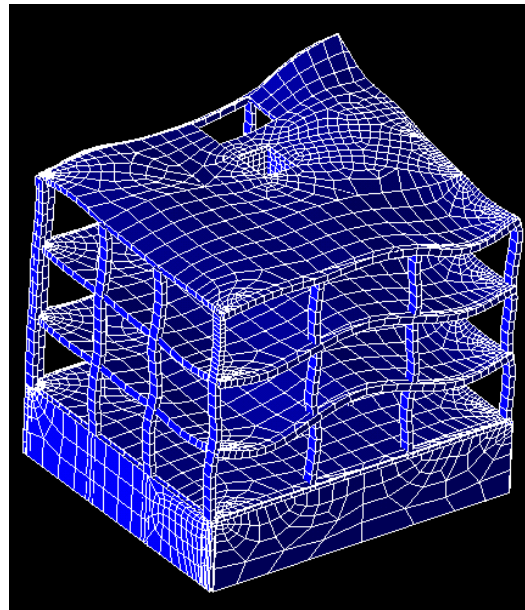
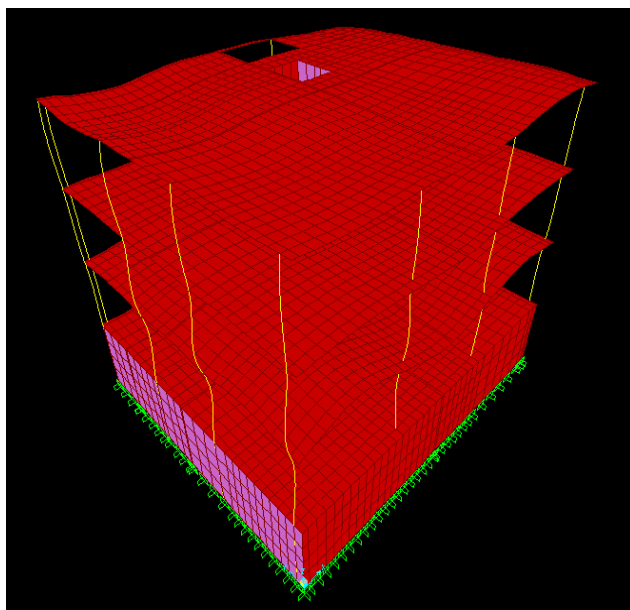
Modo 3**Modo 4**

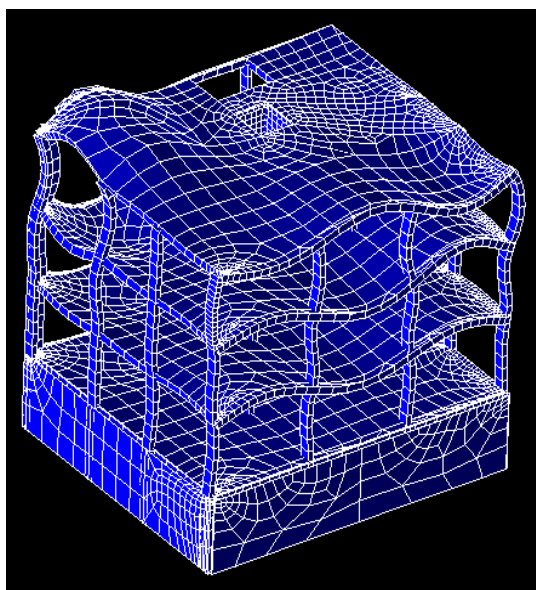
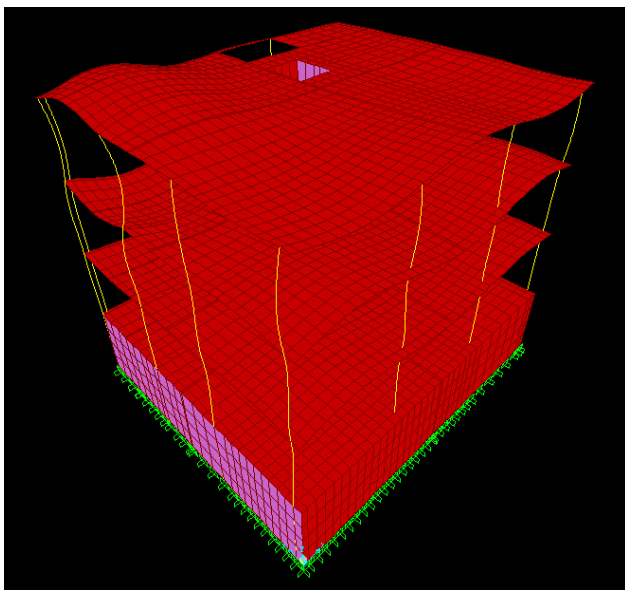
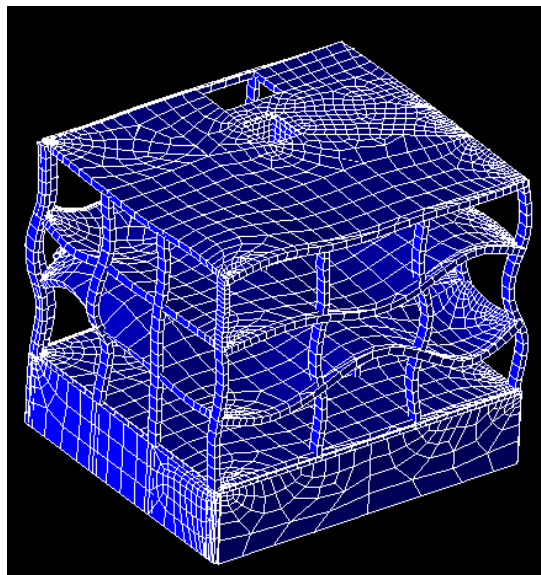
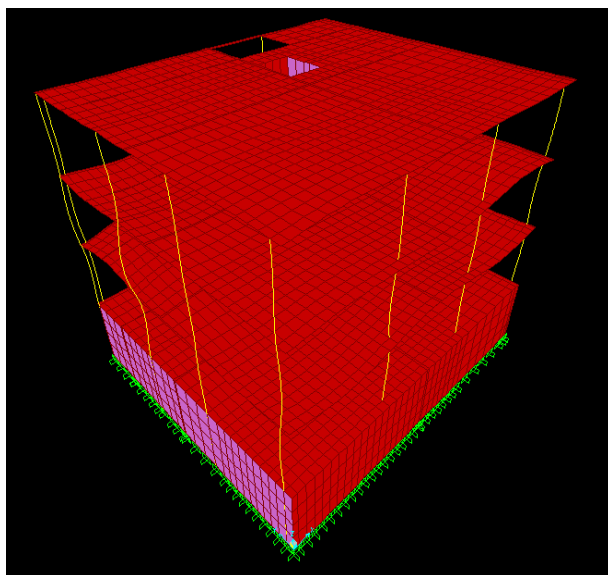
Modo 5**Modo 6**

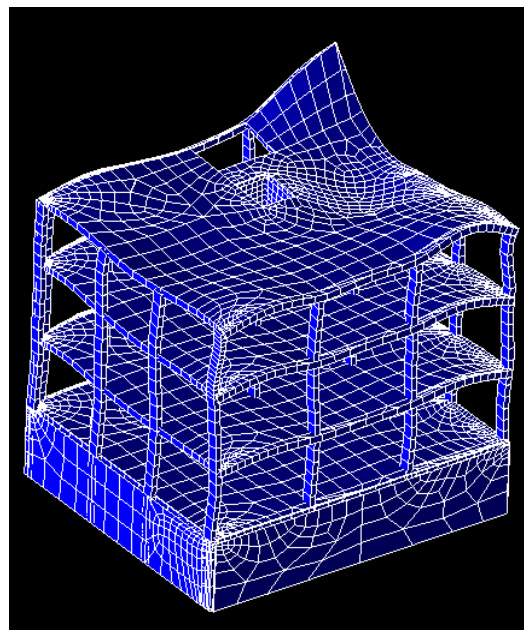
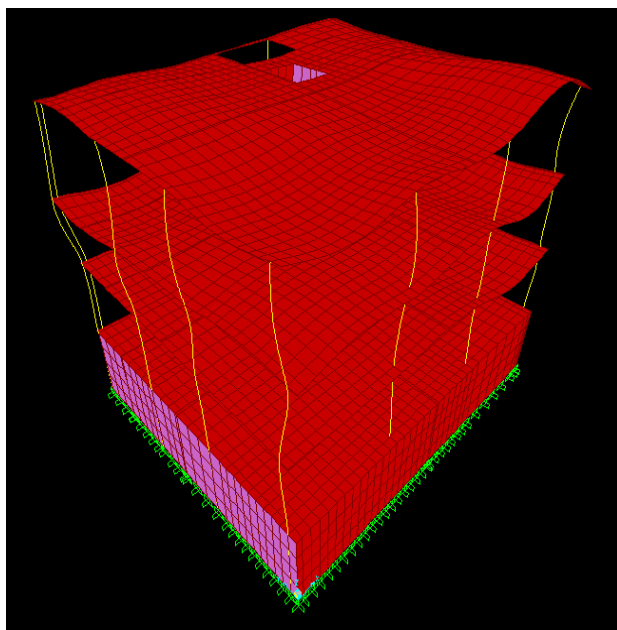
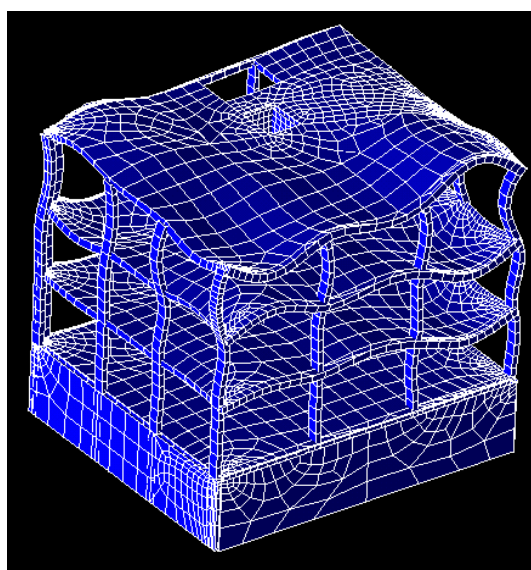
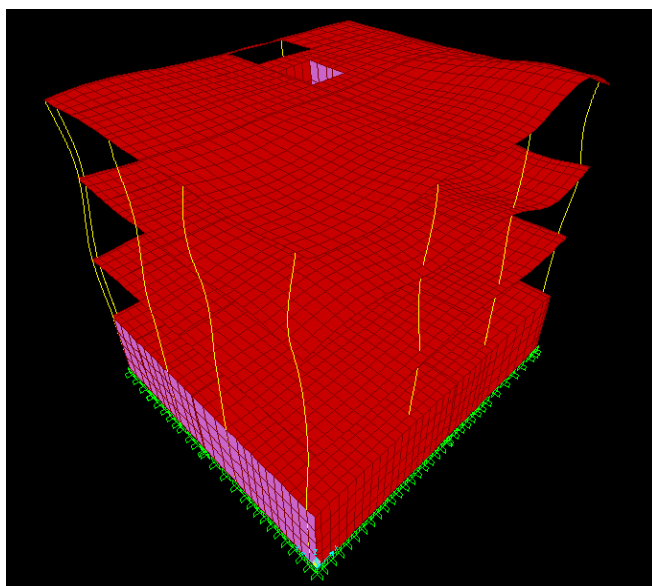
Modo 7**Modo 8**

Modo 9**Modo 10**

Modo 11**Modo 12**

Modo 13**Modo 14**

Modo 15**Modo 16**

Modo 17**Modo 18**

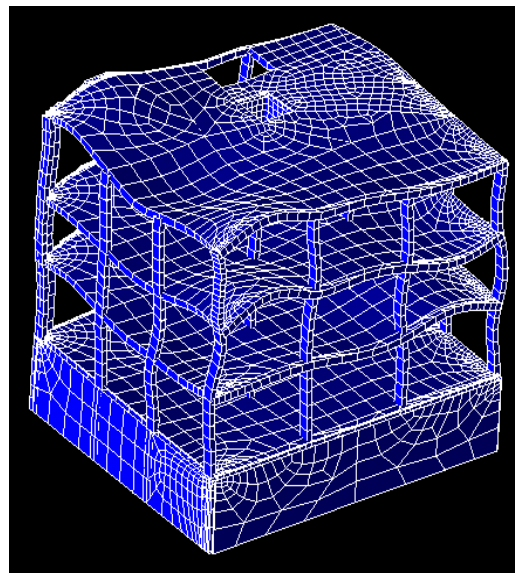
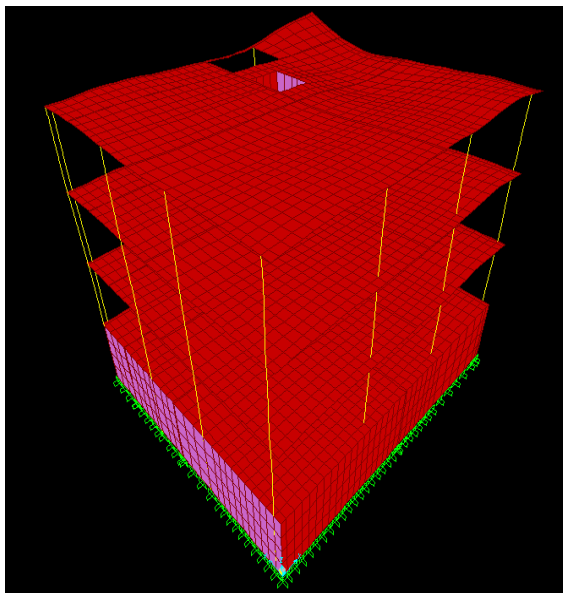
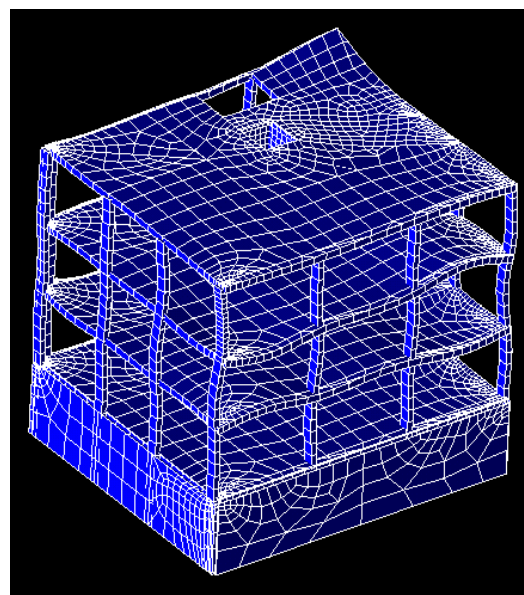
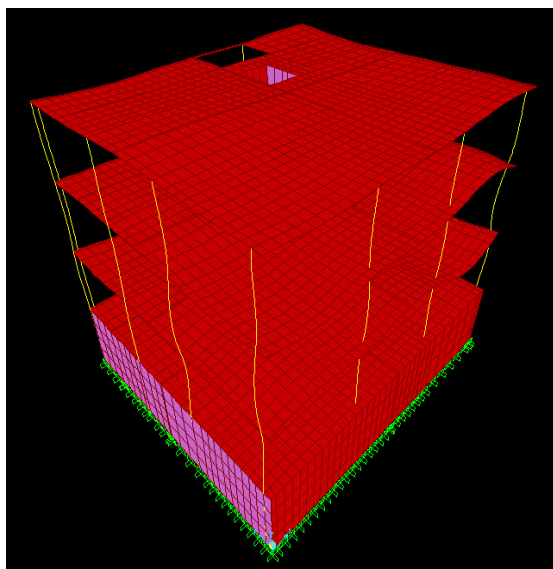
Modo 19**Modo 20**

Tabela 33 – Deformada dos Modos de Vibração